

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SNÍMAČE PRO ASISTENČNÍ SYSTÉMY ŘIDIČE

SENSORS FOR DRIVER ASSISTANCE SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Ptáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Martin Ptáček

ID: 182742

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Snímače pro asistenční systémy řidiče

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je ověření metod elektronické stabilizace řízení vozidel s ohledem na požadované parametry snímačů. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Vypracujte přehled současně používaných elektronických stabilizačních systémů vozidel. Uveďte jejich principy a diskutujte nároky na typy a parametry instalovaných snímačů.
2. Základní systémy elektronické stabilizace (ABS, ASR, ESP) na vhodném modelu realizujte a demonstруйте jejich funkci, nejlépe i s možností demonstrace vlivu kvality snímačů na výslednou kvalitu systému elektronické stabilizace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

REIF, K. Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems. Springer, Wiesbaden, 2014. ISBN 978-3-658-03977-6

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultant:



doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá analýzou používaných systémů pro stabilizaci jízdy vozidel, zejména protiblokovacím systémem ABS, protipokluzovým systémem ASR a systémem stabilizace v zatáčkách ESP. Hlavní důraz je kladen na senzory potřebné pro implementaci těchto systémů a jejich požadované parametry. Zjištěné poznatky jsou aplikovány při implementaci stabilizačního systému na model vozidla v měřítku 1:10. Analýzou funkce a testováním stabilizačních systémů na modelu vozidla je ověřen vliv kvality senzorických dat na kvalitu výsledné stabilizace.

KLÍČOVÁ SLOVA

ABS, ASR, TCS, ESP, senzory úhlové rychlosti, gyroskop, akcelerometr, ESP32, stabilizace, měření, 3D tisk

ABSTRACT

This bachelor thesis is devoted to vehicle stabilization systems, especially to the Anti-lock Braking System ABS, Anti-Skid Regulation ASR and Electronic Stability Program ESP. The main emphasis is placed on sensors needed for implementation of these systems and their required parameters. Findings learned are applied for the implementation of the stabilization system in the model car of the scale 1:10. The relation between the quality of measured sensor data and quality of the resulting stabilization is analyzed using model platform testing.

KEYWORDS

ABS, ASR, TCS, ESP, sensor of the yaw rate sensors, gyroscope, accelerometer, ESP32, stabilization, measurement, 3D print

PTÁČEK, Martin. *Snímače pro asistenční systémy řidiče*. Brno, 2018, 69 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Snímače pro asistenční systémy řidiče“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří vedoucímu této semestrální práce panu doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za podporu, velkou trpělivost a mnoho podnětných diskusí.

Brno

.....

podpis autora

OBSAH

Úvod	11
1 Elektronické stabilizační systémy v automobilech	12
1.1 Jednokolový model vozidla	12
1.2 Protiblokovací systém ABS	18
1.2.1 Historie vývoje ABS	18
1.2.2 Princip funkce	18
1.3 Protiprokluzová regulace ASR/TCS	20
1.4 Elektronická stabilizace jízdy - ESP	23
2 Modelová platforma pro testování stabilizace	26
3 Senzory pro účely stabilizace řízení	29
3.1 Senzory úhlové rychlosti kol	29
3.1.1 Indukční senzory	29
3.1.2 Magnetorezistivní senzory	30
3.1.3 Senzory založené na Hallově jevu	31
3.1.4 Požadavky na senzory z hlediska stabilizačních systémů	32
3.1.5 Senzory použité na modelové platformě	33
3.2 Senzory úhlového natočení kol přední nápravy	34
3.2.1 Senzory použité na modelové platformě	34
3.3 Senzory akcelérátoru	36
3.4 Senzory úhlové rychlosti vozidla	37
3.4.1 MEMS Gyroskopy	37
3.4.2 Požadavky na senzory z hlediska stabilizačních systémů	37
3.4.3 Senzory použité na modelové platformě	38
4 Úpravy modelové platformy pro účely testování stabilizace	40
4.1 Integrace otáčkoměrů do závěsů kol	40
4.2 Integrace senzorů natočení předních kol	40
4.3 Samostatné brzdy kol	42
5 Zprovoznění funkčních prvků modelové platformy	48
5.1 Mikrokontrolér	48
5.2 Vyčítání dat ze senzorů	50
5.3 Ovládání kotoučových brzd	53
5.4 Plošný spoj pro řídicí mikrokontrolér	55

6 Implementace stabilizačních systémů	58
6.1 ABS	58
6.2 Vyhodnocení vlivu parametrů senzorů na kvalitu ABS	58
6.3 ASR/TCS	58
6.4 Vyhodnocení vlivu parametrů senzorů na kvalitu ASR/TCS	59
7 Závěr	63
Literatura	65
Seznam vybraných symbolů veličin a zkratk	66
Seznam příloh	68
A Schéma zapojení	69

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Kinematické schéma fyzikálního modelu jednokolového vozidla	12
1.2	Dynamické schéma fyzikálního modelu jednokolového vozidla	13
1.3	Závislost činitele smykového tření μ pneumatiky na koeficientu prokluzu λ pro různé druhy povrchů [5]	15
1.4	Závislost součinitele smykového tření na koeficientu prokluzu pro bilineární model a $\lambda_d = 0, 2, \mu_z = 1, 0, \mu_h = 0, 9$	16
1.5	Pohled shora na jednokolový model vozidla	16
1.6	Závislost činitele smykového tření μ_{HF} pneumatiky a činitele smykového tření ve směru kolmém na směr jízdy μ_S na koeficientu prokluzu λ pro různé úhly bočního prokluzu α [5]	17
1.7	Průběh regulace brzdného tlaku ABS při brzdění na vozovce s vysokým součinitelem smykového tření [5] [7]	21
1.8	Průběh rozjezdu vozidla na vozovce s nízkým μ s aktivním regulátorem rychlosti hnané nápravy[5]	22
1.9	Průběh rozjezdu vozidla s nesymetrickým μ kol hnané nápravy a aktivním příčným regulátorem uzamčení diferenciálu[5]	23
1.10	Princip funkce stabilizačního systému ESP. Inspirováno [3]	25
2.1	Použitý modelářský podvozek EP Reely EB-250 TW ve výchozím stavu před úpravami.	28
2.2	Srovnání výsledné podoby modelové platformy s moderním elektromobilem	28
3.1	Fukční schéma indukčního senzoru otáček kola automobilu. Inspirováno [7]	30
3.2	Fukční schéma magnetorezistivního senzoru otáček kola automobilu s použitím impulzního kotouče z magneticky měkkého materiálu. Inspirováno [6]	31
3.3	Princip Hallova jevu	32
3.4	Použitý senzor AS5306B s magnetickým kroužkem	34
3.5	Umístění magnetického absolutního senzoru natočení AS5048A a magnetu s diagonálním pólováním AS5000-MD6H-3.	35
4.1	Plošný spoj se senzorem rychlostí otáčení kol AS5306	41
4.2	Umístění plošného spoje se senzorem AS5306 vedle magnetického kroužku na unašeči předního levého kola.	41
4.3	Umístění senzoru natočení předního levého kola okolo svislé osy AS5048A	42
4.4	Zjednodušené schéma kotoučové a bubnové brzdy automobilu.	43
4.5	Plovoucí uchycení brzdového kotouče na hexagonálním unašeči kola modelové platformy.	44

4.6	Výsledná sestava brzdy kola modelové platformy.	44
4.7	Detail umístění excentrického dílu v sestavě kotoučové brzdy	45
4.8	Schéma časového průběhu řídicích pulzů PWM servomotoru.	46
4.9	Hotová sestava zavěšení levého předního kola.	46
4.10	Modelová platforma kompletně osazená otáčkoměry, senzory natočení kol i brzdami.	47
5.1	Přehled měřených a ovládaných veličin na modelové platformě	48
5.2	Schéma informačního toku modelové platformy.	50
5.3	Komunikace a přenosy dat při testování a vývoji modelové platformy.	51
5.4	Požadavek senzoru AS5048A na časovou prodlevu mezi sestupnou hranou signálu CS a první vzestupnou hranou hodinového signálu CLK.	52
5.5	Osy výstupních fyzikálních veličin DMP MPU6050	52
5.6	Snímač síly FSR400.	54
5.7	Schéma použitého zapojení senzoru FSR400 pro měření a nastavení síly působící na brzdovou destičku.	54
5.8	Průběh výstupního elektrického napětí siloměru FSR400 v závislosti na šířce pulzu řízení servomotoru brzdy.	54
5.9	Průběh přepočtené síly působící na brzdovou destičku v závislosti na šířce pulzu řízení servomotoru brzdy.	56
5.10	Pohled na návrh plošného spoje pro řídicí mikrokontrolér ESP32.	56
5.11	Pohled na osazený plošný spoj včetně ESP32 DevKitC.	57
6.1	Průběh obvodových rychlostí kol vozidla s přední brzděnou nápravou během regulovaného brzdění (ABS aktivní).	60
6.2	Průběh úrovně brzdění jednotlivých kol vozidla s přední brzděnou nápravou (ABS aktivní).	60
6.3	Průběh obvodových rychlostí kol vozidla se zadní hnanou nápravou během neregulovaného rozjezdu (ASR pasivní).	61
6.4	Průběh obvodových rychlostí kol vozidla se zadní hnanou nápravou během regulovaného rozjezdu (ASR aktivní).	61
6.5	Průběh obvodových rychlostí kol vozidla se zadní hnanou nápravou během regulovaného rozjezdu (ASR aktivní).	62
A.1	Schéma zapojení řídicího mikrokontroléru ESP32 a ostatních funkč- ních komponent	69

SEZNAM TABULEK

2.1	Parametry použitého modelářského podvozku EP Reely EB-250 TW .	27
2.2	Srovnání parametrů použitého podvozku po transformaci do 1:1 s vozidlem Tesla Model S	27

ÚVOD

Široce rozvinutý automobilismus v současnosti představuje jeden z pilířů moderní společnosti, je rovněž jejím výrazným formujícím faktorem, stejně jako se v něm odráží společenská hlediska dané doby, například bezpečnost, pohodlí, ekologie a náklady. Pro dosažení technických požadavků vznikla postupem času potřeba měřit fyzikální veličiny na vozidle, což vedlo k zavádění jejich měření pomocí senzorů.

Senzory byly v automobilismu zaváděny ve třech vlnách, pomocí kterých je můžeme řadit do následujících kategorií:

1. Hnací ústrojí, kde jsou předmětem měření parametry motoru, převodového ústrojí a palubní diagnostika;
2. Podvozek, kde je měřeno řízení, odpružení, brzdění a stabilita vozidla;
3. Karoserie, kam řadíme ostatní senzory, např. pro bezpečnost, pohodlí a informovanost posádky a zabezpečení vozidla.[8]

Zavedení senzorů v kategorii podvozku bylo do značné míry podmíněno požadavky na zvýšenou bezpečnost automobilismu, zvláště pak na omezení důsledků lidských chyb plynoucích z nezvládnutí řízení vozidla a neznalosti jeho jízdních vlastností vozidla na a za limitem přilnavosti pneumatik s vozovkou. Za účelem omezení těchto nežádoucích vlivů začaly být od konce 80. let 20. století v osobních sériových autech nasazovány elektronické stabilizační systémy a postupně se z příplatkové výbavy stal legislativou vyžadovaný standard.

Přínos elektronických stabilizačních systémů k bezpečnosti v dopravě je značný. Posouzením 12 různých studií se v roce 2011 dospělo k závěru, že stabilizační systém zamezí 40% [1] automobilových havárií, ve kterých hraje roli ztráta kontroly řidiče nad vozidlem. Aspektem, který rovněž ovlivňuje přínos stabilizačních systémů k bezpečnosti, je rovněž adaptace řidiče vedoucí ke zvýšenému riskování při řízení, v horších případech dokonce ve vozidlech nevybavených stabilizačním systémem. Na tomto trendu se ovšem výsledky studií neshodnou.

Předložená práce se zabývá stabilizačními systémy osobních automobilů klasické konstrukce a jejich senzory, zejména kategorií senzorů podvozku se zaměřením na senzory potřebné pro aplikaci:

- protiblokovacího systému ABS,
- protipokluzového systému ASR, TCS,
- stabilizačního systému ESP, ESC

na osobní automobil. Jedná se tedy o senzory úhlové rychlosti kol vozidla, podélné a příčné akcelerace vozidla, úhlové rychlosti zatačení vozidla a úhlu natočení volantu, potažmo předních kol. U těchto senzorů jsou zkoumány požadované parametry, stejně jako ověřena kvalita jejich výstupních dat na výslednou kvalitu regulace stabilizačního systému.

1 ELEKTRONICKÉ STABILIZAČNÍ SYSTÉMY V AUTOMOBILECH

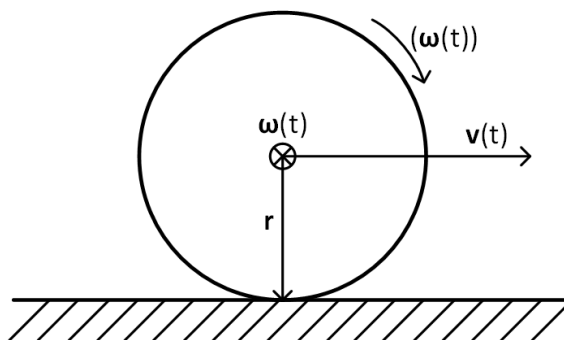
Elektronický stabilizační systém (ESP z angl. Electronic Stability Program) je nadstavbou nad dříve samostatně používanými systémy jako ABS a ASR/TCS, obsahující i další bezpečnostní systémy. Jedná se o sestavu senzorových, výpočetních a aktuátorových komponent instalovaných do vozidla, jejichž hlavním cílem je zvýšení bezpečnosti cestování posádky zvýšením ovladatelnosti a stability za mimořádných jízdních situací. To platí především pro situace, kdy je snížena adheze pneumatik na povrchu vozovky kvůli povětrnostním podmínkám, ale také pro nouzové zásahy do řízení řidičem, např. prudké brzdění nebo úhybný manévr.

O tyto věci se musí ESP v automobilu starat i přes pravděpodobnou nevědomost řidiče o principu fungování, ba dokonce o existenci tohoto systému. Proto je nutné, aby ESP reagovalo vždy v souladu s jeho záměry. Nikdy se však nesmí stát, že by ESP způsobilo zhoršení jízdní situace, nebo dokonce riziko nehody.

1.1 Jednokolový model vozidla

Uvažme základní fyzikální model jednokolového vozidla, který můžeme vidět na obrázku 1.1. Tento model se skládá z hmotného kola o poloměru \vec{r} , valícího se rychlostí $\vec{v}(t)$ po dokonale rovné podložce a současně rotujícího úhlovou rychlostí $\vec{\omega}(t)$.

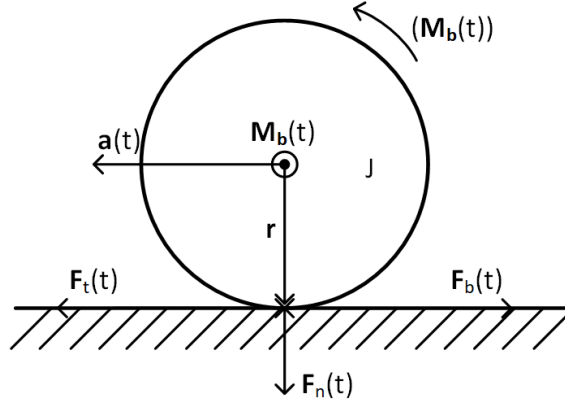
Obr. 1.1: Kinematické schéma fyzikálního modelu jednokolového vozidla



Nejdříve model uvážíme z kinematického hlediska. V ideálním případě, kdy během valení nedochází k prokluzu mezi povrchem kola a podložkou, platí rovnice 1.1. Tato rovnice rovněž vyjadřuje, že velikost povrchové rychlosti otáčení kola je shodná s velikostí rychlosti pohybu středu kola vůči podložce.

$$\vec{v}(t) = \vec{r} \times \vec{\omega}(t) \quad (1.1)$$

Obr. 1.2: Dynamické schéma fyzikálního modelu jednokolového vozidla



Zavedení skalárních veličin 1.2 nám zjednoduší vyjádření koeficientu prokluzu kola během brzdění.

$$\begin{aligned} v(t) &= |\vec{v}(t)| \\ \omega(t) &= |\vec{\omega}(t)| \\ r &= |\vec{r}| \end{aligned} \quad (1.2)$$

Koeficient prokluzu kola je mírou podélné zátěže aplikované na kolo a je definován v rovnici 1.3. Při dokonalém odvalování kola ilustrovaném na obrázku 1.1 a v rovnici 1.1 je koeficient prokluzu roven nule. Při blokaci kola v důsledku brzdění jednokolového modelu vozidla při nenulové rychlosti $v(t) \neq 0$ je koeficient prokluzu roven $\lambda = 1$.

$$\lambda = \frac{v - \omega \cdot r}{v} \times 100\% \quad (1.3)$$

Pro uvážení fyzikálního modelu jednokolového vozidla z dynamického hlediska uvažme veličinu $\vec{M}_b(t)$ představující brzdňý moment generovaný brzdou kola, $\vec{F}_t(t)$ představující třecí sílu, kterou působí podložka na kolo v místě jejich dotyku a $\vec{F}_b(t)$ vyjadřující brzdňý moment přenesený do bodu dotyku kola s podložkou. Moment setrvačnosti kola vztažený k ose jeho otáčení je vyjádřen skalární veličinou J a setrvačná hmotnost modelu veličinou m .

Přesunutím působíště třecí síly $\vec{F}_t(t)$ do těžiště kola čili do jeho středu usnadníme vyjádření pohybové rovnice rotačního pohybu jednokolového modelu vozidla, které vychází z obrázku 1.2.

$$J \cdot \dot{\vec{\omega}}(t) = \vec{M}_b(t) + \vec{r} \times \vec{F}_t(t) \quad (1.4)$$

Uvážením konkrétně případu brzdění valícího se kola můžeme rovnici 1.4 zjednodušit použitím skalárních veličin, což je vidět v rovnici 1.5. Zde si musíme uvědomit,

že síla $F_t(t)$ je silou, která způsobuje zpomalení translačního pohybu jednokolového modelu vozidla, a můžeme pomocí jí zapsat pohybovou rovnici 1.6.

$$J \cdot \dot{\omega}(t) = M_b(t) - r \cdot F_t(t) \quad (1.5)$$

$$F_t(t) = m \cdot a(t) = m \cdot \dot{v}(t) \quad (1.6)$$

Třecí síla $F_t(t)$, kterou působí podložka na jednokolový model vozidla, vždy vzniká jako důsledek tření podložky o kolo, tedy vzájemným pohybem těchto dvou povrchů, rovnice 1.8. Třecí síla závisí na činiteli smykového tření μ a kolmé tlakové síle F_n , která je v případě jednokolového modelu vozidla způsobena gravitačním působením g na hmotnost m modelu, které je dál přeneseno na styčnou plochu kola s podložkou dle rovnice 1.7. V případě našeho modelu je velikost kolmé tlakové síly konstantní, obecně se však může kolmé zatížení kola s časem měnit.

$$F_n = m \cdot g \quad (1.7)$$

$$F_t(t) = \mu \cdot F_n(t) \quad (1.8)$$

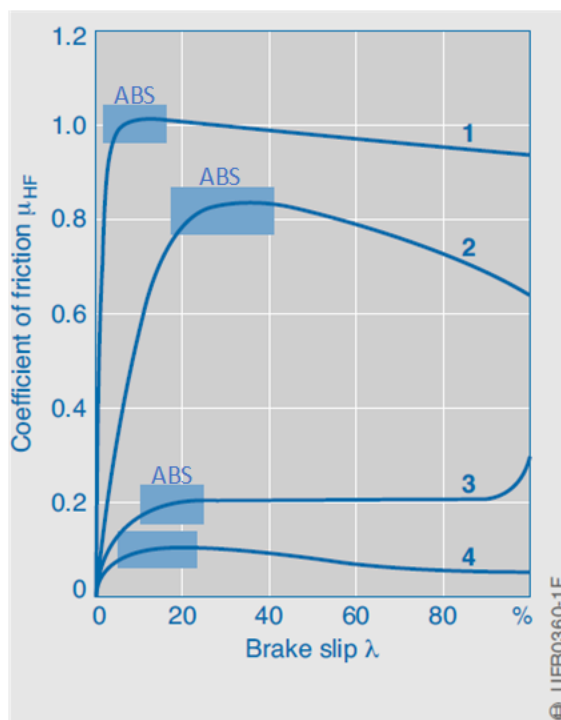
V klasické fyzice je činitel smykového tření konstantní pro všechny hodnoty vzájemné rychlosti povrchů s výjimkou klidového stavu (nulové rychlosti), kdy je zaměněn činitelem klidového tření $\mu_0 > \mu$. Toto rozdělení pro model odvalujícího se kola (pneumatiky) neplatí a budeme muset najít závislost mezi činitelem smykového tření μ a koeficientem prokluzu λ . Tuto závislost můžeme vidět na obrázku 1.3, ve kterém jsou znázorněny případy 4 charakteristických povrchů vozovky:

1. radiální pneumatika na suchém betonu,
2. diagonální pneumatika (historický typ) na mokřém asfaltu,
3. radiální pneumatika na sněhu,
4. radiální pneumatika na ledu.

Na obrázku 1.3 si můžeme všimnout, že pro podmínky 1, 2 a 4 nastává maximum činitele smykového tření μ před dosažením koeficientu prokluzu $\lambda = 100\%$ (blokace kola). Systém ABS udržuje koeficient prokluzu λ v rozmezí určeném modrými obdélníky. To znamená, že za těchto podmínek dosahuje vozidlo vybavené systémem ABS vyššího součinitele smykového tření, a tedy i kratší brzdné vzdálenosti než vozidlo se zablokovánými koly. Za sněhových podmínek (3) je koeficient prokluzu nejvyšší pro zablokové kolo ($\lambda = 100\%$) z toho důvodu, že se před kolem nahromadí nahrnutý sníh a ten zvyšuje brzdicí účinek.

Pro vyjádření činitele smykového tření μ v závislosti na koeficientu prokluzu λ se používá zjednodušený bilineární model popsáný v rovnicích 1.9. Inspirováno [9],

Obr. 1.3: Závislost činitele smykového tření μ pneumatiky na koeficientu prokluzu λ pro různé druhy povrchů [5]



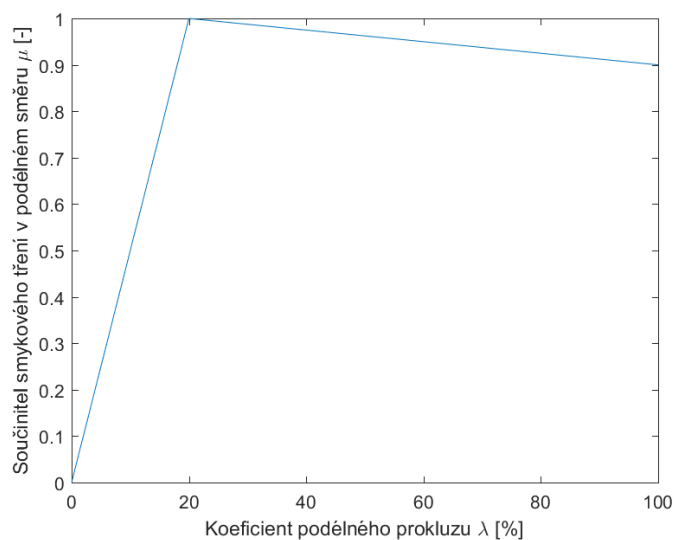
upraveno. V těchto rovnicích λ_d značí koeficient prokluzu, při kterém dosahuje součinitel smykového tření svého maxima μ_z . μ_h označuje součinitel smykového tření při $\lambda = 1$, to znamená při blokaci kola během brzdění. V grafu na obrázku 1.4 je znázorněn průběh činitele smykového tření bilineárního modelu pneumatiky přibližně odpovídající radiální pneumatice na suchém betonu jako na obrázku 1.3.

$$\mu = \begin{cases} \frac{\mu_z}{\lambda_d} \cdot \lambda & \text{pro } \lambda \leq \lambda_d \\ \mu_z - \frac{\mu_z - \mu_h}{1 - \lambda_d} (\lambda - \lambda_d) & \text{pro } \lambda > \lambda_d \end{cases} \quad (1.9)$$

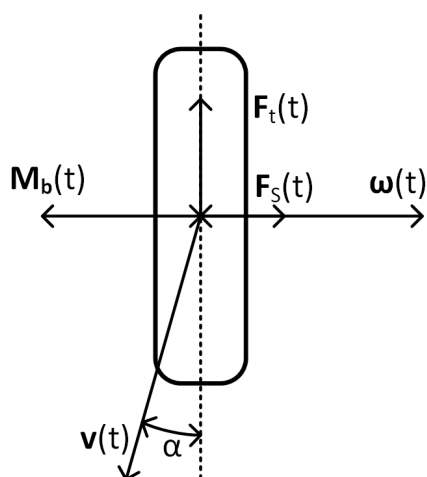
Zkrácení brzdě dráhy je důležité, ovšem hlavním přínosem systému ABS je zvýšená příčná stabilita a zachování vodicí schopnosti kola, tedy přenášení bočních sil. Na obrázku 1.5 je znázorněn jednokolový model vozidla při pohledu shora s vyznačením osy otáčení s vektory úhlové rychlosti $\vec{\omega}(t)$ a brzděného momentu $\vec{M}_b(t)$. Oproti známému vektoru síly smykového tření v podélném směru $\vec{F}_t(t)$ přibyl vektor síly smykového tření v příčném směru $\vec{F}_s(t)$, tedy rovnoběžný s osou otáčení kola. Tato síla je charakteristická pro zatáčení vozidla a vzniká jako důsledek toho, že osa otáčení kola není kolmá na vektor jeho pohybu $\vec{v}(t)$. Úhel mezi podélnou osou kola a vektorem pohybu kola $\vec{V}(t)$ označíme α a budeme jej nazývat úhel bočního prokluzu.

Na obrázku 1.6 si můžeme všimnout, že s rostoucím koeficientem prokluzu λ

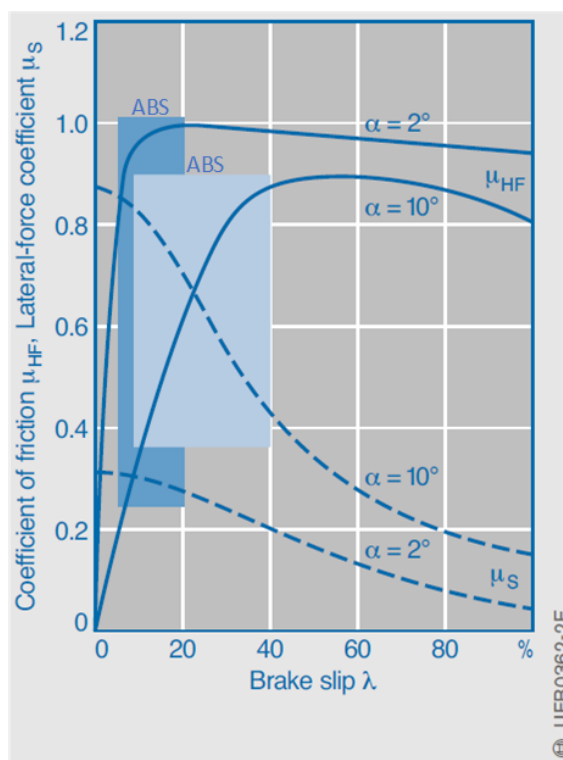
Obr. 1.4: Závislost součinitele smykového tření na koeficientu prokluzu pro bilineární model a $\lambda_d = 0,2$, $\mu_z = 1,0$, $\mu_h = 0,9$



Obr. 1.5: Pohled shora na jednokolový model vozidla



Obr. 1.6: Závislost činitele smykového tření μ_{HF} pneumatiky a činitele smykového tření ve směru kolmém na směr jízdy μ_S na koeficientu prokluzu λ pro různé úhly bočního prokluzu α [5]



razantně klesá hodnota činitele smykového tření ve směru kolmém na směr jízdy μ_S , což zhoršuje schopnost vedení pneumatiky vozidla zatáčkou. Modrý obdélník opět znázorňuje oblast regulace ABS pro malý úhel bočního prokluzu $\alpha = 2^\circ$, kdy je téměř maximální činitel smykového tření v podélném směru μ_{HF} dosažen již při koeficientu prokluzu $\lambda \sim 10\%$. Světle modrý obdélník vytyčuje oblast regulace ABS při větším úhlu bočního prokluzu $\alpha = 10^\circ$, kdy je třeba dovolit vyšší hodnotu koeficientu prokluzu $\lambda \sim 25\%$ za účelem dosažení vyšší hodnoty součinitele smykového tření ve směru jízdy. [5]

Jedním z hlavních cílů protiblokovacího systému ABS a protiprokluzového systému ASR je udržení koeficientu podélného prokluzu λ v mezích, které poskytují dostatečnou hodnotu součinitele smykového tření ve směru kolmém na směr valení kola μ_S . Tento parametr přímo reflektuje schopnost kola vést vozidlo zatáčkou po řidičem určené dráze.

1.2 Protiblokovací systém ABS

Protiblokovací systém ABS (z angl. Anti-lock Braking System) je základním stupněm vývoje všech následujících stabilizačních systémů. Hlavní úlohou ABS je zabránění blokace kol při prudkém brzdění, popř. brzdění na kluzkém povrchu a tím zajištění lepšího vedení kol při současných změnách směru jízdy. O toto se stará regulací tlaku v hydraulických brzdových okruzích, tedy regulací brzdného účinku na jednotlivá kola. Rozdíl mezi vozidlem s aktivním ABS a bez něj je nejvíce patrný při brzděném manévru, kdy je zároveň nutná změna směru vozidla. Vozidlo bez systému se při blokaci brzděných kol stává neovladatelným, kdežto vozidlo s ABS si do určité míry zachovává schopnost změny směru svého dopředného pohybu.

1.2.1 Historie vývoje ABS

Roku 1936 vydala firma Bosch patent na "mechanismus k prevenci blokace kol motorového vozidla" pracující na hydromechanickém principu. Tento revoluční vynález byl velmi komplikovaný, a tedy náchylný na poruchy, navíc jeho reakční časy nedosahovaly dostatečně nízkých hodnot. Až v roce 1964 v době nástupu digitálních technologií začaly práce nanovo v odnoži Bosch Teldix. Roku 1970 byly hotovy první prototypy plně elektronicky řízené jednotky ABS 1, jejíž základní strukturu nesou všichni následovníci. ABS 1 byla se svými téměř 1000 elektronickými součástkami pro sériovou produkci stále příliš komplikovaná a nespolehlivá, ovšem splňovala požadavky z hlediska regulace brzdného momentu. Až v roce 1978, po 14 letech vývoje, byla započata sériová výroba jednotky ABS 2, jejíž komplikovanost byla se 140 elektronickými součástkami značně redukována. Systém ABS s jednotkou ABS 2 se nejprve stal příplatkovou výbavou luxusních německých značek osobních automobilů. V následujících letech probíhaly práce na kompaktnosti ABS jednotky a její spolupráci s dalšími systémy jízdní stability TCS, ESP.[2] V současnosti je systém ABS standardně instalován do všech nově vyráběných vozidel v Evropě[6].

1.2.2 Princip funkce

V osobním automobilu klasické konstrukce je síla, kterou působí řidič na brzdový pedál, přenášena skrze tlak v hydraulických okruzích a podtlakový posilovač na brzdové destičky, které třením o brzdový kotouč působí na kolo brzdícím momentem. Klíčovou komponentou pro implementaci protiblokovacího systému ABS je soustava elektromagnetických ventilů, pomocí kterých může řídicí jednotka regulovat hydraulický tlak působící na brzdové destičky nezávisle na úrovni sešlápnutí brzdového pedálu řidičem. Jedná se o tzv. hydraulický modulátor. Elektromagnetické ventily mohou regulovat brzdný tlak ve třech režimech:

- **Zvýšení tlaku** - Část hydraulického okruhu ústící do brzdového třmene je přímo spojena s hlavním brzdovým válcem, který je pevně spojen s pedálem brzdy.
- **Udržení tlaku** - Hydraulické spojení mezi hlavním brzdovým válcem a třmenem brzdy je rozpojeno, tudíž je síla působící na brzdové destičky konstantní.
- **Snížení tlaku** - Spojení mezi hlavním brzdovým válcem a třmenem je stále rozpojeno, je ovšem otevřen kanál pro odtok brzdové kapaliny z části hydraulického okruhu okolo brzdového třmene pryč do rezervoáru brzdové kapaliny. V tomto režimu dochází k poklesu síly působící na brzdové destičky.[7]

Z výše popsaného řešení hydraulického modulátoru vyplývá, že změna síly působící na brzdové destičky nemůže probíhat skokově, ale pouze definovaným lineárně rostoucím/klesajícím průběhem. Zvukové a vibrační projevy ABS jsou spojeny rychlým přepínáním elektrohydraulických ventilů.

Pro regulaci brzdného momentu kol potřebuje protiblokovací systém ABS znát rychlost otáčení jednotlivých kol a referenční rychlost, což je skutečná dopředná rychlost vozidla. Z těchto veličin je možné vypočítat koeficient skluzu λ a obvodové zpomalení pro každé kolo a také zpomalení vozidla, což jsou skutečně žádané vstupní veličiny pro regulaci brzdného momentu.

Rychlost otáčení kol je přímo měřena senzory umístěnými na kolech vozidla, kdežto referenční rychlost je poměrně obtížně získatelnou veličinou. V případě částečného brzdění je referenční rychlost určena z obvodové rychlosti nejrychleji se otáčejícího kola. Pokud ovšem dojde k intenzivnímu brzdění, je možné, že obvodová rychlost žádného z kol neodpovídá skutečné dopředné rychlosti vozidla. V těchto případech je referenční rychlost určována z počáteční referenční rychlosti na začátku brzdného manévru a je s časem lineárně snižována se sklonem odpovídajícím podmínkám na začátku brzdění. V případě, že je vozidlo vybaveno senzorem dopředného zrychlení (akcelerometr), je možné sklon lineárně klesající závislosti měnit právě v závislosti na měřeném zpomalení[7]. Tento princip je příbuzný inerciálním navigačním systémům, ovšem zde je určována pouze rychlost, nikoliv poloha, a také jen po velmi omezený časový úsek.

Na obrázku 1.7 je vidět typický průběh regulace brzdného tlaku ABS při brzdění na vozovce s vysokým součinitelem smykového tření. Zde jsou označené veličiny:

- v_F - skutečná dopředná rychlost vozidla
- v_{Ref} - referenční dopředná rychlost vozidla
- λ_1 - obvodová rychlost na hranici stabilní oblasti μ křivky
- v_R - obvodová rychlost brzděného kola

Průběh brzdění na obrázku 1.7 je rozdělen do 8 fází:

1. Během první fáze je na základě požadavku řidiče zvyšován tlak brzdové kapaliny, což způsobuje brzdný moment působící na kolo. Obvodová zrychlení

kola je záporné, protože kolo zpomaluje, stejně jako celé vozidlo. V této fázi je hydraulický modulátor ABS v režimu zvýšení tlaku.

2. Při překročení dolní meze obvodového zrychlení kola $-a$ je zahájena fáze 2, ve které je hydraulický modulátor přepnut do režimu udržení tlaku. Důvod k tomu, že není rovnou přistoupeno ke snížení brzdného tlaku, je ten, že není překročen mezní koeficient prokluzu kola a tudíž by snížení tlaku vedlo k nevyužití brzdného potenciálu a prodloužení brzdné dráhy.
3. Překročením mezního koeficientu prokluzu kola, který je reprezentován obvodovou rychlostí λ_1 je hydraulický modulátor přepnut do režimu omezení tlaku. Obvodová rychlost λ_1 je určena na základě referenční rychlosti v_{Ref} . Během této fáze klesá tlak brzdové kapaliny a obvodové zpomalení brzděného kola se dále nezvyšuje.
4. Zvýšení obvodového zrychlení kola nad hodnotu $-a$ je hydraulický modulátor opět přepnut do režimu udržení tlaku. V této fázi se obvodová rychlost brzděného kola zvyšuje.
5. Při překročení hraniční hodnoty $+A$ obvodové zrychlení kola je hydraulický modulátor opět přepnut do režimu zvýšení tlaku.
6. Po klesnutí obvodového zrychlení kola pod úroveň $+A$ je hydraulický modulátor přepnut do režimu udržení tlaku.
7. Poklesnutí obvodového zrychlení kol pod hodnotu a značí návrat koeficientu prokluzu do stabilní oblasti μ křivky a také současné nevyužití maximálního brzdného potenciálu. V této fázi je brzdný tlak stupňovitě zvyšován.
8. Při poklesu obvodového zrychlení kola pod hodnotu $-a$ je nyní hydraulický rovnou přepnut do režimu snížení tlaku s vynecháním režimu udržení jako ve fázi 2.

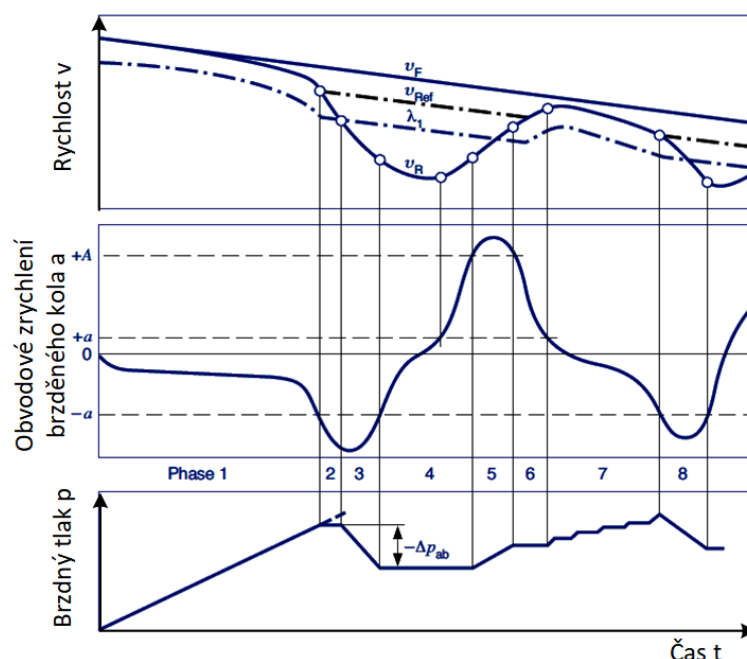
Po zbytek brzdného manévru jsou střídány fáze 7 a 8. [5]

1.3 Protiprokluzová regulace ASR/TCS

Cílem regulace ABS bylo zamezit přílišnému skluzu kol vozidla při brzdění. Systém regulace prokluzu ASR (Anti-Skid Regulation) nebo také TCS (Traction Control System) má za cíl regulaci v opačném případě, tedy omezení prokluzu kol při akceleraci vozidla. Prokluz hnáných kol vozidla je nežádoucí kvůli snížené schopnosti kol přenášet boční síly. Výhodou systému ASR je možnost dosažení vyšší trakční síly hnáných kol díky udržení prokluzu kola v oblasti okolo vrcholu μ křivky, což zaručuje vysoký koeficient smykového tření mezi kolem a vozovkou v podélném směru. Další výhodou systému ASR je omezení opotřebení pneumatik hnáných kol.

Za účelem snížení hnacího momentu na kolech vozidla jsou používány 2 metody:

Obr. 1.7: Průběh regulace brzdného tlaku ABS při brzdění na vozovce s vysokým součinitelem smykového tření [5] [7]



1. Základní metodou je omezení hnacího momentu motoru. V případě zážehových motorů je toto možné provést nastavením polohy škrticí klapky, změnou časování zážehu a omezením množství vstřikovaného benzínu. U vznětových motorů je pro omezení momentu použito pouze omezování množství vstřikované nafty.
2. Pro dosažení rychlejších časů odezvy systému ASR je použito i přibrzdování jednotlivých hnacích kol. Tímto je možné dosáhnout až 2x rychlejší odezvy systému ASR. Přibrzdování jednotlivých kol v rámci regulace ASR vyžaduje dodatečné rozšíření hydrauliky systému ABS.

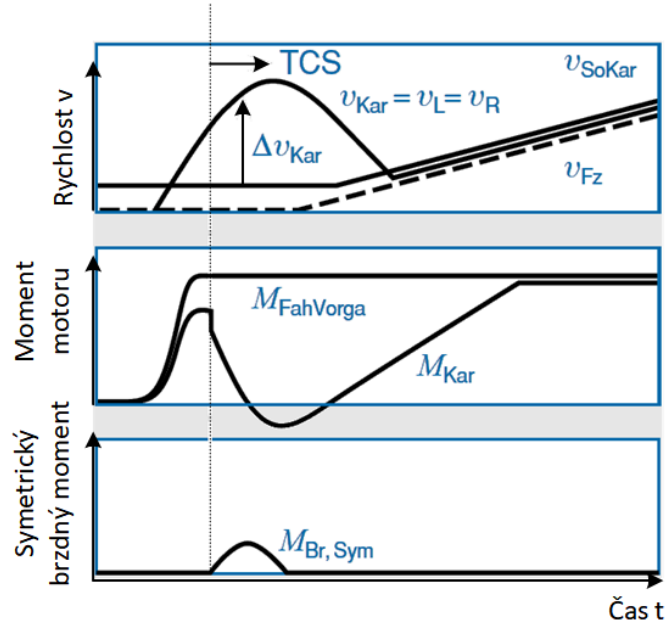
Systém ASR/TCS můžeme rozdělit na dva funkční celky, které sdílí senzory, aktuátory i řídicí jednotku, ale liší se v regulované fyzikální veličině:

1. Regulátor rychlosti hnané nápravy (Drive axle speed controller);
2. Příčný regulátor uzamčení diferenciálu (Transversal differential lock controller).

Vstupní veličinou Regulátoru rychlosti hnané nápravy je právě tato rychlost získaná z rychlostí otáčení kol hnané nápravy. V případě, že souhrnný koeficient prokluzu hnané nápravy překoná stanovenou mez, je hnací moment kol omezován snížením momentu motoru a symetrickým brzděním obou kol nápravy. Průběh rozjezdu vozidla na vozovce s nízkým μ je vidět na obrázku 1.8. Významy jednotlivých veličin jsou vyznačeny:

- $v_{Kar} = v_L = v_P$ - obvodová rychlost kol hnané nápravy počítaná jako arit-

Obr. 1.8: Průběh rozjezdu vozidla na vozovce s nízkým μ s aktivním regulátorem rychlosti hnané nápravy[5]



metický průměr rychlostí obou kol, viz rovnice 1.10. v tomto případě je rovna rychlosti levého i pravého kola;

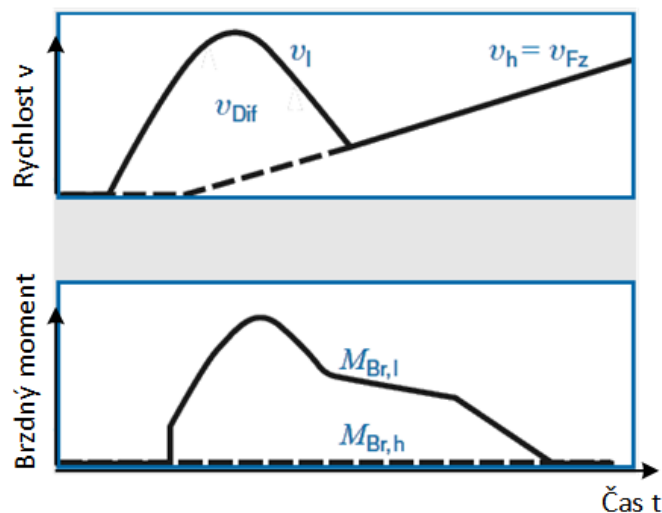
- v_{SoKar} - referenční obvodová rychlost kol hnané nápravy;
- v_{Fz} - skutečná dopředná rychlost vozidla
- $M_{Br, Sym}$ - Symetrický brzdňý moment;
- $M_{FahVorga}$ - Řidičem požadovaný moment motoru;
- M_{Kar} - Skutečný výstupní moment motoru;

Při zvyšování žádaného momentu řidičem $M_{FahVorga}$ roste skutečný hnací moment motoru M_{Kar} . Poté co obvodová rychlost kol hnané nápravy překročí referenční rychlost v_{SoKar} určenou jednotkou ASR/TCS, dojde k omezení hnacího momentu motoru a aplikaci symetrického brzdňého momentu $M_{Br, Sym}$ na hnaná kola. Skutečné průběhy těchto výstupních veličin závisí na interní implementaci stabilizačního systému, která je založena na PID regulátoru.

$$v_{Kar} = \frac{v_L + v_P}{2} \quad (1.10)$$

Příčný regulátor uzamčení diferenciálu, zvaný též elektronická uzávěrka diferenciálu, používá asymetrické aplikace brzdňého momentu na kola hnané nápravy za účelem omezení rozdílu obvodových rychlostí otáčení kol hnané nápravy. Elektronická uzávěrka diferenciálu poskytuje výraznou výhodu v případě, že se jedno z hnaných kol nachází na povrchu s výrazně nižším součinitelem smykového tření μ (například krajnice vozovky) než druhé kolo a samotný diferenciál bez mechanické

Obr. 1.9: Průběh rozjezdu vozidla s nesymetrickým μ kol hnané nápravy a aktivním příčným regulátorem uzamčení diferenciálu[5]



uzávěrky omezí trakci kola na povrchu z vysokým μ dle kola s nízkým μ . Činnost této části systému je vidět na obrázku 1.9.

1.4 Elektronická stabilizace jízdy - ESP

Předchozí stabilizační systémy se vždy zaměřovaly na konkrétní jízdní situaci jako akceleraci a brzdění. Systém ESP (Electronic Stability Program, Elektronisches Stabilitätsprogramm), který v sobě zmíněné systémy integruje, se již zaměřuje na podporu stability vozidla za všech jízdních situací. Na rozdíl od systémů ABS a ASR, které se zabývají hlavně skluzem a prokluzem kol v podélném směru, se systém ESP zabývá i skluzem kol v příčném směru.

Regulace jízdní dynamiky byla poprvé vyvinuta firmou Bosch v roce 1995 pod názvem FDR. Do povědomí ovšem systém vešel až v roce 1997 pod známou zkratkou ESP. Dnes z tohoto systému vychází celá řada odlišně pojmenovaných stabilizačních systémů různých automobilových a technologických značek jako například ASMS, AHS (Chevrolet), DSC (BMW), PSM (Porsche), VDC (Alfa Romeo, Subaru), CST (Ferrari), MSP (Maserati),... Ačkoliv je vnitřní implementace těchto systémů rozdílná, existuje mnoho společných principů, ze kterých všechny vychází a proto bývají označovány také zkratkou ESP. [7]

Fyzikální veličiny, které systém ESP používá jako vstup do svých algoritmů, můžeme rozdělit na měřené veličiny:

- úhlová rychlost vozidla okolo vertikální osy Z;
- úhel natočení volantu potažmo předních kol;

- boční zrychlení v ose Y;
 - dopředná rychlost vozidla (nelze přímo měřit);
- a na základě měřených veličin odhadované veličiny:

- prokluz/skluz pneumatik;
- podélné a příčné síly působící na kola;
- úhly směrových úchylek kol;
- úhel směrové úchylky těžiště;
- příčná rychlost vozidla.

Principem regulátoru jízdní dynamiky ESP je kontrola a regulace následujících veličin, které jsou odhadnuty na základě vstupních dat ze senzorů:

- Úhlová rychlost vozidla okolo svislé osy Z;
- Odchylka vektoru rychlosti promítnutého do těžiště vozidla od podélné osy vozidla.

Na základě těchto veličin vypočítává systém ESP potřebný moment působící na vozidlo okolo svislé osy Z za účelem přiblížení skutečně měřených veličin požadovaným hodnotám. Pro generování tohoto momentu jsou použity aktuátory, které ovlivňují činnost těchto fyzikálních veličin:

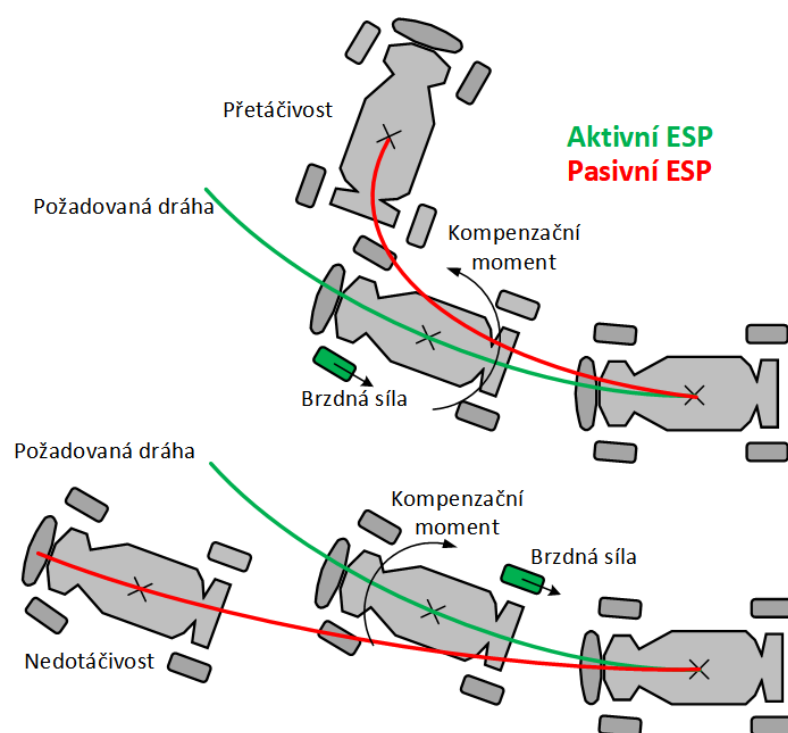
- Brzdný moment jednotlivých kol;
- Hnací moment motoru;
- Natočení předních kol aktivním zásahem do řízení (ESP II).

Požadované hodnoty úhlové rychlosti okolo osy Z, které jsou následně konfrontovány se skutečně změřenými hodnotami, jsou získány na základě vstupů:

- Úhel natočení volantu potažmo předních kol;
- Odhadnutá dopředná rychlost vozidla.

Analyzovaná jízdní situace je zobrazena na obrázku 1.10.

Obr. 1.10: Princip funkce stabilizačního systému ESP. Inspirováno [3]



2 MODELOVÁ PLATFORMA PRO TESTOVÁNÍ STABILIZACE

Jako platforma Ackermanova podvozku pro testování stabilizace byl volen modelářská podvozek v měřítku 1:10 EP Reely EB-250 TW, kterou je možné v základním provedení s obrácenou montáží kol vidět na obrázku 2.1 a jeho detailní popis parametrů v tabulce 2.1. Hlavními důvody pro volbu tohoto podvozku byly:

- Dostatečně přesné uchycení kol, které mělo oproti konkurenci minimální vůle
- Robustní kovová konstrukce
- Možnost volby pohonu motoru na jednotlivých nápravách
- Možnost obrácené montáže kol zajišťující velký prostor v oblasti závěsu kola (pro senzory a brzdy)

Použitý modelářský podvozek měl již ve standardní konfiguraci vyřešeny následující funkční prvky:

- 4 nezávisle odpružená kola s olejovými tlumiči
- Rozvod momentu motoru ke všem kolům s pevným spojením náprav
- Mechanismus zatáčení předních kol pomocí servomotoru
- Kuželový diferenciál na přední i zadní nápravě

Z hlediska možnosti implementace stabilizačních systémů chyběly modelářskému podvozku následující funkční prvky:

- Brzdy jednotlivých kol
- Senzory rychlosti otáčení jednotlivých kol
- Senzory natočení kol přední nápravy ve smyslu zatáčení
- Senzor úhlové rychlosti a zrychlení podvozku
- Řídicí jednotka zpracovávající informace ze senzorů a ovládající aktuátory

Uvážíme-li parametry podvozku uvedené v tabulce 2.1 a pokusíme-li se transformovat na osobní automobil měřítko 1:1, obdržíme poměrně zajímavé parametry. Pro výpočet transformovaných rozměrů byl použit přímo koeficient měřítko 10. Pro výpočet transformované hmotnosti, výkonu motoru a energie baterie byla použita krychle koeficientu měřítko, tedy 1000.

¹www.tesla.com

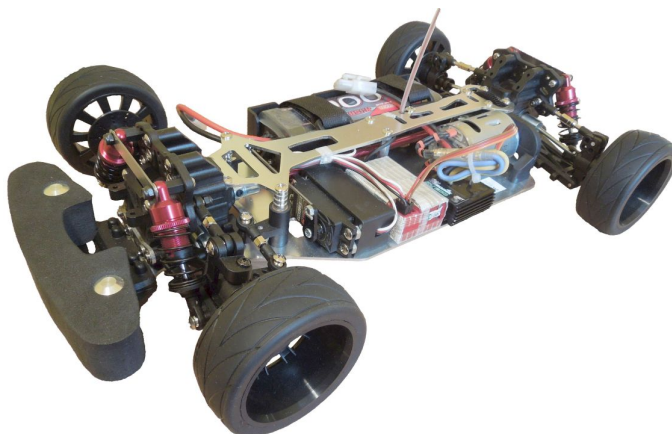
Tab. 2.1: Parametry použitého modelářského podvozku EP Reely EB-250 TW

Měřítko	1:10
Délka	374 mm
Šířka	200 mm
Výška	77 mm
Rozvor	262 mm
Světlá výška	16 mm
Vnější průměr pneumatik	66 mm
Šířka pneumatik	27 mm
Výsledná hmotnost	2,0 kg
Motor	AC elektromotor EXCEED 13,5T velikosti 540
Regulátor otáček	EXCEED SPORT 50A
Baterie	NiMH 7,2 V; 4000 mAh

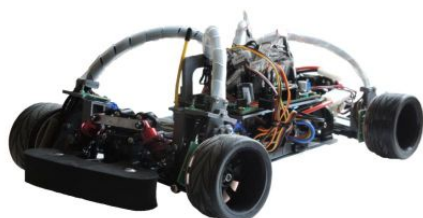
Tab. 2.2: Srovnání parametrů použitého podvozku po transformaci do 1:1 s vozidlem Tesla Model S¹

Parametr	Přepočet použitého podvozku na 1:1	Tesla Model S 75D 2017
Rozchod kol [mm]	2060	1699 (zadní)
Rozvor [mm]	2620	2959
Vnější průměr pneumatik [mm]	660	703 (základ)
Šířka pneumatik [mm]	270	245 (základ)
Provozní hmotnost [kg]	2000	2163
Výkon motorů [kW]	194	386
Energie baterie [kWh]	28,8	75

Obr. 2.1: Použitý modelářský podvozek EP Reely EB-250 TW ve výchozím stavu před úpravami.



Obr. 2.2: Srovnání výsledné podoby modelové platformy s moderním elektromobilem



Upravený modelářský podvozek 1:10



Automobil Tesla Model S 75 D (2017)

3 SENZORY PRO ÚČELY STABILIZACE ŘÍZENÍ VOZIDLA

3.1 Senzory úhlové rychlosti kol

Měření úhlové rychlosti kol vozidla je základním předpokladem pro možnost použití elektronické stabilizace řízení. Senzory používané v automobilovém průmyslu musí mít zejména vysokou odolnost, spolehlivost, přesnost, malé rozměry a nízkou cenu. Od počátků motorismu byly pro měření dopředné rychlosti vozidla používány indukční senzory otáček, které sloužily pouze pro indikaci rychlosti řidiči. Následně byly používány otáčkoměry s magnetorezistivními senzory, které umožňují přesnější měření při nízkých úhlových rychlostech. V dnešní době jsou téměř výhradně používány senzory založené na Hallově jevu. Ačkoliv je možné pro měření úhlové rychlosti použít i další principy jako optické a kapacitní, jsou kvůli náročným provozním podmínkám v automobilech používány téměř výhradně senzory pracující na magnetických principech[6].

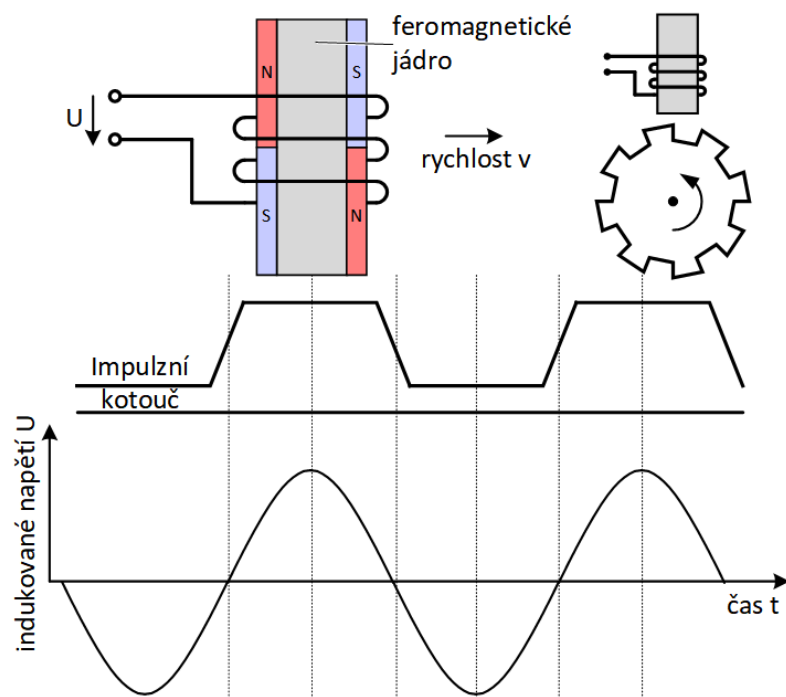
3.1.1 Indukční senzory

Indukční senzory úhlové rychlosti pracují na principu elektromagnetické indukce, kdy je při změně velikosti vektoru magnetické indukce cívkou na jejích kontaktech indukováno elektrické napětí, což je popsáno 2. Maxwellovou rovnicí (zákon elektromagnetické indukce). Z hlediska zdroje energie se tedy jedná o pasivní senzor, protože pro jeho činnost mu není potřeba dodávat energii externě, ale její původ je ve měřeném fyzikální jevu a v případě indukčních senzorů úhlové rychlosti pochází z rotační kinetické energie měřeného tělesa.

Na obrázku 3.1 můžeme vidět schéma induktivního senzoru úhlové rychlosti. Skládá se z permanentního magnetu (1), cívky typu solenoid (2), feromagnetického jádra cívky (3), což jsou části, které představují stator. Další částí je feromagnetické ozubené kolo (4), které představuje rotor, jehož rychlost otáčení je měřena. Číslo (5) na obrázku označuje magnetické indukční čáry v okolí permanentního magnetu.

V případě, že k jádru cívky přiléhá mezera mezi zuby ozubeného kola, uzavírá se jádrem cívky určitá část magnetického pole permanentního magnetu. V případě, že k jádru cívky přiléhá zub ozubeného kola, uzavře se jádrem cívky větší část magnetického pole magnetu a dojde tedy ke změně velikosti vektoru magnetické indukce uvnitř cívky. Jako důsledek této změny je na kontaktech cívky indukováno elektrické napětí, které je pomocí výstupní logiky převáděno na digitální signál. Velikost indukovaného napětí závisí na rychlosti změny magnetické indukce a tedy i rychlosti otáčení impulzního kotouče. To nás přivádí k výrazné nevýhodě pasivního

Obr. 3.1: Funkční schéma indukčního senzoru otáček kola automobilu. Inspirováno [7]



indukčního senzoru, což je poměrně vysoká minimální detekovatelná úhlová rychlost měřeného rotoru.

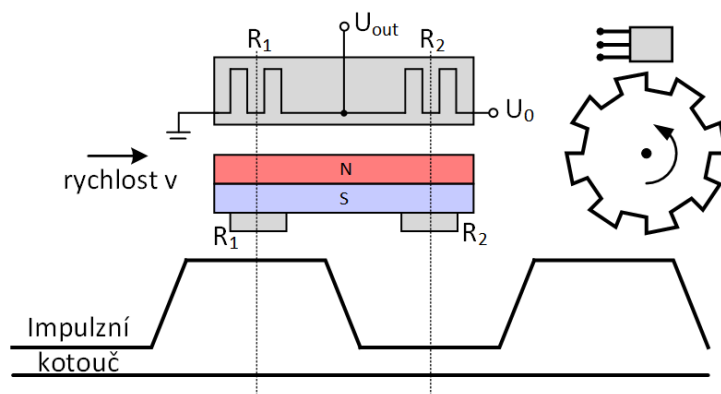
3.1.2 Magnetorezistivní senzory

Magnetorezistivní senzory úhlové rychlosti jsou aktivními senzory, protože je pro jejich správnou činnost nutné externě dodávat energii ve formě elektrického proudu. Magnetorezistivní senzory mohou pracovat v podobném schématu jako pasivní indukční senzory s tím rozdílem, že pro detekci změn magnetického pole není použita cívka, ale magnetorezistivní materiál, který mění svůj elektrický odpor v závislosti na síle magnetického pole ve svém okolí.

Druhou možností pro použití magnetorezistivního senzoru je použití kroužku s daným počtem magnetických pólových párů podél svého obvodu, čili opět impulzní kotouč.

Magnetorezistivní senzory jsou vyráběny z krystalického polovodiče InSb a změnou svého elektrického odporu reagují na sílu magnetického pole ve směru elektrického proudu. Protože je vnitřní odpor magnetorezistivních částí malý, je za účelem dosažení celkového odporu v řádu $k\Omega$ nutné sériově propojit větší množství těchto citlivých částí, které navíc musí být souhlasně orientované. Toto propojení je možné uskutečnit přímo v polovodičovém krystalu. Až do hodnoty $0,3T$ je závislost elektrického odporu senzoru na velikosti magnetické indukce kvadratická. Nad touto

Obr. 3.2: Funkční schéma magnetorezistivního senzoru otáček kola automobilu s použitím impulzního kotouče z magneticky měkkého materiálu. Inspirováno [6]



hodnotou přechází k lineární závislosti. Pro dosažení dostatečné citlivosti jsou ovšem senzory provozovány pod touto hranicí.

Závislost odporu magnetorezistivních senzorů na teplotě je značná, přibližně s poklesem na $\frac{1}{2}$ elektrického odporu se vzrůstem teploty o 100K. Proto jsou tyto senzory používány zpravidla ve dvojici tvořící napěťový dělič. V této konfiguraci musí být zajištěno, že na každý ze senzorů dvojice působí magnetické pole opačné orientace, což je vidět na obrázku 3.2, kde je použit stejný typ impulzního kotouče jako u indukčního senzoru.

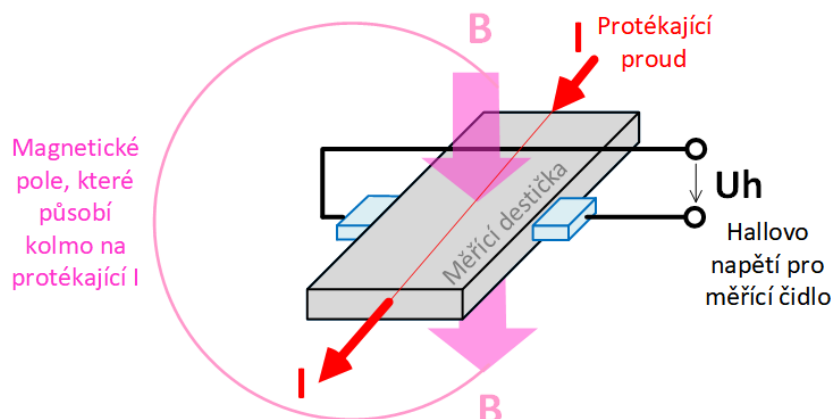
Magnetorezistivní senzory se vyznačují poměrně vysokým výstupním napětím v řádu voltů, čímž nevzniká potřeba pro dodatečné zesilování. Další výhodou je odolnost senzoru proti elektromagnetickému rušení, stejně jako externím magnetickým polím. Kvůli teplotní závislosti výstupního signálu je použití těchto senzorů omezeno na inkrementální, případně binární měření.[6]

Zásadní výhodou aktivních senzorů je možnost snímání otáčení impulzního kotouče již z klidového stavu, což je velmi výhodné pro protiprokluzové systémy ASR, které bývají často aktivní právě v oblastech nízkých úhlových rychlostí kol. Další výhodou aktivních senzorů oproti pasivním je vyšší citlivost na změny magnetického pole a tím pádem nižší nároky na tenkost vzduchové mezery mezi statorem a rotorem. Dále se tento typ senzorů lépe hodí k miniaturizaci a nízko nákladové výrobě.

3.1.3 Senzory založené na Hallově jevu

Dalším principem používaným u aktivních senzorů rychlosti otáčení je Hallův jev. Hallův jev je vznik příčného elektrického pole a napětí v přítomnosti magnetického pole při pohybu elektrostaticky nabitých částic (elektrický proud). Změny napětí

Obr. 3.3: Princip Hallova jevu



vyvolané změnami magnetického pole jsou vyhodnoceny a využity k vlastnímu měření v senzorech. Sensor dovoluje stejnou konfiguraci impulzního kotouče vlastního umístění jak je tou v případě magnetorezistivních senzorů.

3.1.4 Požadavky na senzory z hlediska stabilizačních systémů

Dle dostupné literatury je možné požadavky na senzory úhlové rychlosti kol vozidla shrnout v následujících odstavcích:

Senzory musí být dostatečně odolné při náročných podmínkách, které nastávají v automobilovém provozu. Jedná se zejména o změny teploty, vibrace a elektromagnetické rušení. Tento požadavek prakticky vylučuje použití senzorů pracujících na optických a kapacitních principech. Naopak senzory pracující na magnetických principech zmíněným podmínkám zpravidla vyhovují.[6]

Senzory musí poskytovat spolehlivá a přesná data i v nízkých rychlostech, až do minimální rychlosti $2,5 \text{ km h}^{-1}$, což je limitní rychlost, při které musí být ještě protiblokovací systém ABS aktivní. [5]

Protiblokovací systém ABS musí reagovat na blokaci brzděného kola v jednotkách milisekund. Reakcí je zde patrně myšleno vydání povelu aktuátoru, což je v případě ABS hydraulický modulátor brzděného tlaku. Do udaného intervalu se tedy musí vejít čas od změření rychlosti otáčení kola, přes přenos informace ze senzoru do řídicího mikrokontroléru po zpracování informace algoritmem a vydání příslušného povelu. [6]

Obecné požadavky na přesnost senzorů v automobilu dovolují vyšší nepřesnost, než 1% z měřeného rozsahu. Výjimkou je senzor hmotnosti vzduchu nasávaného do motoru, na jehož přesnost jsou kladeny vyšší nároky.[6]

3.1.5 Senzory použité na modelové platformě

Pro měření úhlové rychlosti otáčení kol modelové platformy byly použity magnetické inkrementální senzory pracující na Hallově principu od rakouské firmy AMS. Jedná se o integrovaný obvod AS5306 určený pro měření lineárního nebo rotačního pohybu pomocí vícepólových magnetických pásků nebo kroužků. Velkou výhodou tohoto řešení je možnost měřit rychlost otáčení bez nutnosti umístění senzoru na konec osy rotujícího předmětu. Tato vlastnost je klíčová pro možnost měření úhlové rychlosti kol modelové platformy, protože umístění senzorů z vnější strany kol by bylo konstrukčně velmi obtížné, navíc by již mohly přesnost umístění senzoru více ovlivňovat různé vůle a nepřesnosti.

Uvnitř integrovaného obvodu AS5306 se nachází lineárně uspořádané Hallové senzory. Při pohybu vícepólového magnetu v okolí senzoru je na Hallových senzorech generován harmonický signál, uvažme sinus. Díky vhodné vnitřní konfiguraci senzorů a definované vzdálenosti jednotlivých pólů magnetu je rovněž generován další harmonický signál fázově posunutý oproti prvnímu o $\frac{\pi}{2}$, uvažme cosinus. Díky integrovanému "Automated Gain Control" dokáže senzor zpracovávat široký rozsah velikostí generovaných harmonických signálů a tedy i magnetické indukce od vícepólového magnetu od 10 do 60 mT. Pomocí interpolačního obvodu je 1 perioda harmonického signálu, která odpovídá délce jednoho pólového páru, rozdělena na 160 pozic, kterým odpovídá 40 pulzů výstupního kvadrurního signálu.

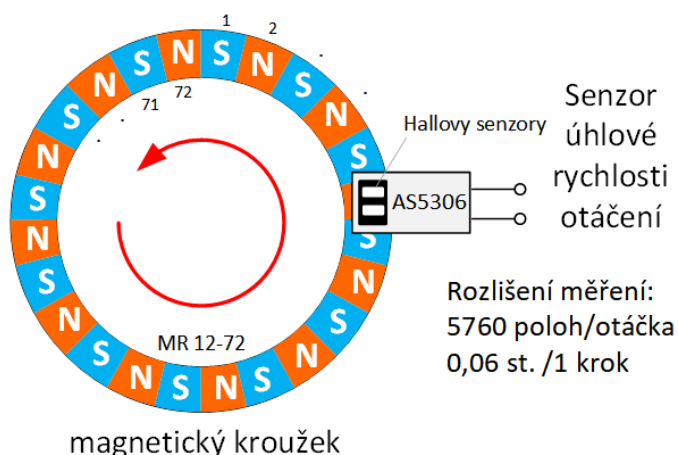
Jako vícepólový magnet byl zvolen magnetický kroužek MR12-72, rovněž dodaný firmou AMS, potažmo Bomatec AG. Nominální délka jednoho pólu je 1,2 mm, což odpovídá požadavkům senzoru AS5306. Vnitřní poloměr kroužku 12 mm je rovněž vhodný pro umístění na unašeci kola modelu vozidla. Magnetický kroužek nese 72 magnetických pólů, tedy 36 pólových párů. Při zpracování každé z hran kvadrurního signálu dostáváme 160 poloh na pólový pár, tedy $36 \cdot 160 = 5760$ poloh na 1 otáčku kola, což odpovídá rozlišení 12,49 bit/ot..

Maximální měřitelná rychlost vícepólového magnetu vůči senzoru AS5306 je stanovena na $v_{m,max} = 12 \text{ m s}^{-1}$. Uvážíme-li efektivní poloměr magnetického kroužku $r_m = 13,75 \text{ mm}$ a poloměr kola modelu vozidla $r_{kola} = 33 \text{ mm}$, můžeme vyjádřit maximální měřitelnou dopřednou rychlost modelu pomocí rovnice 3.1. Maximální vypočtená dopředná rychlost $103,7 \text{ km h}^{-1}$ je více než trojnásobkem reálně dosažitelné rychlosti modelu s použitou motorizací.

$$v_{max} = v_{m,max} \cdot \frac{r_{kola}}{r_m} = 12 \cdot \frac{33}{13,75} = 28,80 \text{ m s}^{-1} = 103,7 \text{ km h}^{-1} \quad (3.1)$$

Pro senzor AS5306B je udávána chyba linearit do 1 LSB (nejméně významného bitu) pro ideální magnet, jehož pól má přesně definovanou délku 1,2 mm. V případě lineárních vícepólových magnetů je toto snadněji dosažitelné než v případě

Obr. 3.4: Použitý senzor AS5306B s magnetickým kroužkem



magnetického kroužku, u kterého hraje hlavní roli přesnost umístění senzoru vůči ose magnetu. Případná nepřesnost má přímý vliv na zdánlivou délku magnetického pólu a tedy i chybu linearity interpolace v rámci jednoho pólového páru.

Pro indikaci velikosti magnetické indukce ve svém okolí používá senzor AS5306 kontrolní analogový výstup, jehož rostoucí napětí značí klesající hodnotu magnetické indukce. Doporučené rozmezí 1,2 až 3V je zpracováno mikrokontrolérem a ukazuje správnost seřízení vzájemné polohy senzoru a magnetického kroužku.

3.2 Senzory úhlového natočení kol přední nápravy

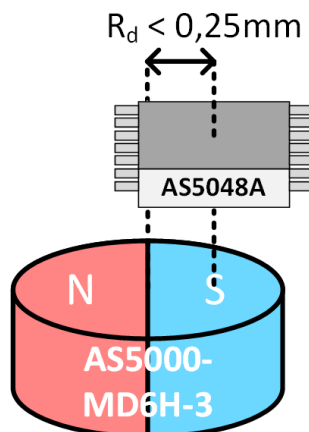
3.2.1 Senzory použité na modelové platformě

Pro měření úhlu natočení předních kol okolo vertikální osy Z byly zvoleny magnetické absolutní senzory AS5048A pracující na Hallově principu od firmy AMS. Na rozdíl od senzoru AS5306 musí být tyto senzory umístěny přesně v ose otáčení měřeného předmětu a tedy na konci jeho osy, což ovšem v případě natočení předních kol nepředstavuje závažný konstrukční problém.

Okolo středu pouzdra AS5048A se nachází Hallové senzory měřící velikost složky magnetické indukce kolmé na horní plochu pouzdra. Digitálním zpracováním analogových signálů (DSP) z Hallových senzorů je dosaženo vysokého rozlišení 14 bit/ot. Diagonálně pólovaný magnet umístěný těsně nad plochu čipu generuje magnetické pole, jehož směr magnetických indukčních čar je čipem měřen. Jako magnet byl zvolen jako doporučený AS5000-MD6H-3 o průměru 6mm a maximální velikosti vertikální složky magnetické indukce okolo 70 mT při vzdálenosti 1,1mm od osy magnetu, což spadá do požadované velikosti magnetické indukce od 30 do 70mT.

Nejnáročnějším konstrukčním požadavkem je maximální dovolená vzdálenost osy středu senzoru AS5048A od osy magnetu 0,25mm, což je znázorněno na obrázku 3.5. Na toto omezení je brán zřetel při návrhu tištěných úchytů senzoru i magnetu.

Obr. 3.5: Umístění magnetického absolutního senzoru natočení AS5048A a magnetu s diagonálním pólováním AS5000-MD6H-3.



Pro získávání měřených dat byla zvolena sběrnice SPI (Serial Peripheral Interface), protože vůči čtení výstupní pulzní modulace PWM nedochází k dalším nepřesnostem během přenosu a zpracování informace a navíc je pomocí sběrnice možná pokročilejší diagnostika senzoru stejně jako nastavení nulové polohy magnetu.

Z hlediska kvality měřených dat je pro nás důležitý parametr "System propagation delay" udávající časovou prodlevu mezi odečtením hodnot magnetického pole Hallovými senzory a odesláním vypočtené hodnoty natočení magnetu. Typická hodnota tohoto systémového zpoždění je $t_{prop} = 100\mu s$, což vyhovuje teoretickým požadavkům.

Dalším důležitým parametrem senzoru je chyba linearity, která je výrobcem udána jako nelinearita v měřené jednotce $\pm 1.2^\circ$ pro případ vzdálenosti osy senzoru od osy magnetu $R_d = 0,5mm$ a v širokém teplotním rozsahu. Ve výrobcem specifikovaném případě je použit magnet o průměru 8mm, který je z hlediska vlivu chyby vycentrování výhodnější než použitý menší magnet o průměru 6mm, pro další výpočty tento rozdíl však zanedbejme. Přepočteme-li udanou hodnotu na chybu linearity v celém rozsahu dle rovnice 3.2, získáme chybu linearity 0,67%, která platí i v zúženém rozsahu v rámci něhož jsou senzory provozovány na modelu vozidla.

$$\delta_L = \frac{\Delta y_{max}}{y_{max} - y_{min}} = \frac{1.2^\circ}{180^\circ} = 0,67\% \quad (3.2)$$

Zavěšení předních kol umožňuje jejich natočení okolo vertikální osy v rozsahu $y \in (-25, 25)^\circ$ vůči nulové poloze odpovídající přímě jízdě. S použitím známé chyby

linearity můžeme vypočítat maximální chybu měřené hodnoty způsobenou nelinearitou senzoru

$$\Delta y_{max} = \delta_L \cdot (y_{max} - y_{min}) = 6,7 \cdot 10^{-3} \cdot 25^\circ = 0,17^\circ \quad (3.3)$$

Střední kvadratická hodnota šumu výstupního signálu senzoru AS5048A je výrobce stanovena na $\pm 0.06^\circ$ a je tedy srovnatelná s chybou linearity. Je ji ovšem na rozdíl od chyby linearity možné potlačit průměrováním několika následujících výstupních hodnot, což při maximální vzorkovací frekvenci 11,25kHz nepředstavuje výrazné zhoršení doby odezvy na změnu měřené hodnoty.

3.3 Senzory akcelerátoru

Díky své značné jednoduchosti se pro měření žádané úrovně akcelerátoru (plynu) od řidiče používá v současnosti potenciometr ve formě senzoru úhlového natočení. Principem toho senzoru je změna výstupního napětí na pohyblivém kontaktu, který se pohybuje po odporové dráze představované drátovým nebo plošným rezistorem, na jehož kontakty je přivedeno napětí. Výhody tohoto řešení jsou zejména nízká cena, snadná aplikace, odolnost proti rušení a vysoká přesnost (lepší než 1% z rozsahu).

Dalším principem používaným pro měření polohy plynového pedálu je Hallův jev, kdy je měřenou veličinou buď velikost nebo směr vektoru magnetické indukce v okolí Hallova senzoru. V prvním případě je Hallův senzor umístěn do vzduchové mezery v magnetickém obvodu z magneticky měkkého materiálu. V jiném místě je magnetický obvod přerušen vzduchovou mezerou, nad kterou se rotací pohybuje permanentní magnet spojený s pedálem plynu, osa jehož pólování je rovnoběžná se směrem magnetického obvodu. Při přibližování středu magnetu vzduchové mezeře roste magnetický indukční tok obvodem, na což reaguje Hallův senzor změnou výstupního napětí. Nevýhodou tohoto senzoru je nízký úhlový rozsah a citlivost na přesnost výroby. V případě měření směru magnetických indukčních čar je použito několika radiálně uspořádaných Hallových senzorů v pouzdře umístěném mezi dvěma permanentními magnety zajišťujícími homogennost magnetického pole mezi nimi.

Jak v případě potenciometrického, tak Hallova principu pro měření polohy plynového pedálu jsou senzory pro zvýšení bezpečnosti zdvojené, aby byla zachována funkčnost i v případě jedné poruchy. [6]

V případě modelové platformy je pro měření žádaného plynu/brzdy a natočení volantu použit také potenciometr, který je součástí modelářské vysílačky GM XG-6i. Snímaná hodnota je následně bezdrátově přenesena pomocí frekvenční modulace v pásmu 2,4GHz do přijímače, ze kterého je informace do hlavního mikrokontroléru ESP32 přenesena dále pomocí pulzní modulace PWM.

3.4 Senzory úhlové rychlosti vozidla

3.4.1 MEMS Gyroskopy

Veličinou nezbytnou pro výpočty jízdní stability systému ESP je úhlová rychlost vozidla okolo svislé osy Z nebo také rychlost stáčení vozidla. Ve vozidlech vybavených systémem ESP jsou pro měření této veličiny používány mikromechanické (MEMS) gyroskopy. Díky svým nízkým výrobním nákladům a vysoké kompaktnosti nahradily původně používané vysoce přesné mechanické senzory.

Pro měření úhlové rychlosti používají tyto senzory Coriolisova efektu, který vysvětluje působení Coriolisovy síly na hmotný bod pohybující se v rámci rotujícího vztažného systému. V případě MEMS gyroskopů používaných ve stabilizačních systémech je používána dvojice mas oscilujících v protifázi na frekvenci vyšší než 2kHz. Ke každé z mas je připevněn senzor měřící zrychlení v rovině kolmé na osu oscilace vibrující masy. Toto zrychlení je úměrné úhlové rychlosti senzoru a rychlosti dosažené oscilací masy. Za účelem omezení vlivu zrychlení senzoru na měření úhlové rychlosti jsou od sebe výstupní signály akcelerometrů odečteny.

Nevýhodou MEMS senzorů oproti čistě mechanickému řešení jsou nižší přesnost a vyšší nároky na elektroniku zpracovávající výstupní signály. Za účelem omezení vlivu zrychlení na měřenou úhlovou rychlost by navíc měly být umístěny v blízkosti těžiště automobilu. I přes tyto omezující faktory jsou dnes téměř výhradně pro stabilizační systémy používány. [5]

3.4.2 Požadavky na senzory z hlediska stabilizačních systémů

I pro senzory používané v automobilovém průmyslu je nutná kalibrace hodnoty nulového úhlového driftu ZRO, stejně jako korekce zesílení z měřené na výstupní hodnotu. Kvůli rozmanitosti vnitřní struktury stabilizačních systémů a různých postupů k zpracování senzorických dat lze těžko stanovit konkrétní požadavky na použité senzory. Za referenční gyroskop používaný běžně v automobilovém průmyslu byl dle [4] zvolen integrovaný obvod Analog Devices ADXRS300[11], jehož hlavní charakteristiky lze shrnout do:

- Nízký vliv vibrací na měřenou úhlovou rychlost;
- Vysoká odolnost na rázy (až 2000g)
- Možnost diagnostiky senzoru
- Rozsah měření $\pm 300^\circ \text{s}^{-1}$
- Provozní teplota -40 až 85°C
- Parazitní efekt lineárního zrychlení typicky $0,5^\circ \text{s}^{-1} \text{g}^{-1}$
- Parazitní efekt změn napájecího napětí typicky $1^\circ \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$

3.4.3 Senzory použité na modelové platformě

Pro měření prostorového natočení a zrychlení modelu vozidla byl zvolen velmi rozšířený MEMS integrovaný obvod MPU6050 americké firmy InvenSense. Tento senzor v sobě integruje 3 osý gyroskop, 3 osý akcelerometr a výpočetní jednotku "DMP - Digital Motion Processor™" zpracovávající měřená data do formátu přímo použitelného ve fyzikálních výpočtech. Díky kombinaci trojic akcelerometrů a gyroskopů může být senzor popsán pojmem "6 osá inerciální měřicí jednotka". Pro zpracování výstupů MEMS gyroskopů a akcelerometrů používá senzor vždy po 3 AD převodnicích s rozlišením 16 bitů. Rozsah maximálních úhlových rychlostí je možné nastavit od $\pm 250^\circ \text{s}^{-1}$ do $\pm^\circ \text{s}^{-1}$ a rozsah maximálních zrychlení od $\pm 2g$ do $\pm 16g$. Pro komunikaci s hlavní výpočetní jednotkou je v případě verze MPU6050 použita I²C sběrnice, pomocí které jsou nastavovány registry senzoru např. pro nastavení měřeného rozsahu a také čteny registry obsahující měřené hodnoty. Senzor MPU6050 se velmi prosadil díky tomu, že jako první integroval komplexní měření pohybu spolu s DMP ve velmi malém "QFN - Quad Flat No-leads" pouzdře o bočním rozměru 4mm, což umožnilo jeho masové použití ve spotřební elektronice, např. v mobilních telefonech.

Velmi výrazný vliv na chybu měření úhlové rychlosti má tolerance činitele citlivosti "Sensitivity Scale Factor Tolerance", která se dle výrobce pohybuje v rozsahu $\pm 3\%$ a odpovídá nepřesnostem při MEMS výrobě. Dalším důležitým faktorem je tolerance činitele citlivosti způsobená změnou teploty "Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature" udaná v rozmezí $\pm 2\%$. Samotná nelinearita měřených dat $\pm 0,2\%$ hraje oproti tolerancím zmíněným výše malou roli.

Poměrně špatných parametrů dosahuje samotný gyroskop MPU6050 v oblasti chyby nulové úhlové rychlosti "Zero-Rate Output, Bias", jejíž tolerance je udána v rozsahu $\pm 20^\circ \text{s}^{-1}$. Stejně tolerance dosahuje i ZRO způsobená změnou teploty v rozsahu od -40°C do $+85^\circ \text{C}$. Díky internímu zpracování dat pomocí DMP a teplotní kompenzace vlastním teploměrem je ovšem možné dosáhnout řádově nižší výstupní hodnoty nulového úhlového driftu ZRO.

V případě vnitřních akcelerometrů MPU6050 je stanovena tolerance počáteční kalibrace $\pm 3\%$. Teplotní závislost změny citlivosti $\pm 0,2\%$ nehraje příliš významnou roli stejně jako chyba linearity $\pm 0,5\%$.

Toleranční parametry nulového zrychlení vnitřních akcelerometrů jsou pro osy X a Y (rovnoběžné s horní plochou čipu) výrobcem stanoveny na $\pm 50mg = 0,49\text{m s}^{-2}$. Tolerance nulového zrychlení pro osy X a Y v důsledku změny teploty čipu od 0°C do 70°C je stanovena na $\pm 35\text{m s}^{-2}$. [13]

Ačkoliv parametry samotných vnitřních senzorů modulu MPU6050 nedosahují zdaleka požadovaných parametrů, v kombinaci s interním zpracováním dat pomocí

DMP a kalibrace konkrétního kusu je možné modul použít i pro velmi náročné aplikace jako je stabilizace řízení létajících dronů a proto bylo rozhodnuto o použití i pro testování stabilizace modelu vozidla. Nutno podotknout, že ačkoliv je měřenou veličinou úhlová rychlost gyroskopu, výstupem DMP je úhlové natočení, ze kterého je úhlová rychlost dále vypočítána.

4 ÚPRAVY MODELOVÉ PLATFORMY PRO ÚČELY TESTOVÁNÍ STABILIZACE

Model vozidla musel projít zásadními změnami zejména v oblasti závěsů všech kol a pohonného ústrojí. Pro výrobu navržených konstrukčních dílů byla použita aditivní technologie 3D tisku převážně z materiálu PLA (polymléčná kyselina). Pro počítačové modelování objektů byl použit návrhový CAD program Autodesk Inventor 2018. Pro tisk dílů byla použita 3D tiskárna Prusa i3 MK2S.

4.1 Integrace otáčkoměrů do závěsů kol

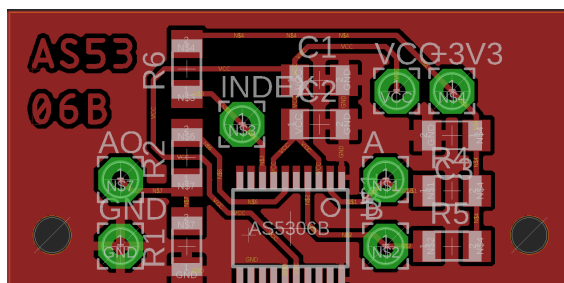
Z hlediska rozměrů magnetického kroužku MR12-72 a požadavků na polohy senzoru AS5306 se možnost použití univerzálního plošného spoje pro umístění SMD součástky SSOP - "Shrink small outline package"s vzájemnou vzdáleností vývodových kontaktů 0,65mm ukázala jako neschůdná. Důvodem byla nutnost umístění senzoru na úplném okraji plošného spoje tak, aby okolo osy otáčení zbyl dostatek místa na plastový unašeč brzdového kotouče. Proto byl pomocí návrhového programu na plošné spoje Autodesk Eagle 9.0.0 navržen spoj, který je vidět na obrázku 4.1. Tento plošný spoj je připraven k zapájení senzoru AS5306 na úplném okraji desky a rovněž obsahuje rezistory a kondenzátory potřebné pro správnou funkci senzoru.

Při konstrukci úchytu plošného spoje se senzorem AS5306 byl brán hlavní zřetel na možnost dodatečného nastavení vzdálenosti mezi senzorem a magnetickým kroužkem. Toho bylo docíleno uchycením spoje dvojicí šroubů M2 a zajištěním odpovídajícími maticemi. Dalším důležitým východiskem byla doporučená vzdálenost osy lineárního pole Hallových senzorů od osy otáčení magnetu 13,75mm. Výrazným omezením pro umístění plošného spoje byly okolní součástky závěsu předního kola, které v kombinaci s deskou v prvních verzích omezovaly možnost zatačení. Výsledné umístění je vidět na obrázku 4.2, kde jsou vyznačeny komponenty: a) inkrementální senzor AS5306, b) magnetický kroužek MR12-72, c) plošný spoj, d) unašeč brzdového kotouče, e) hlavní díl zavěšení předního kola, f) osa otáčení kola.

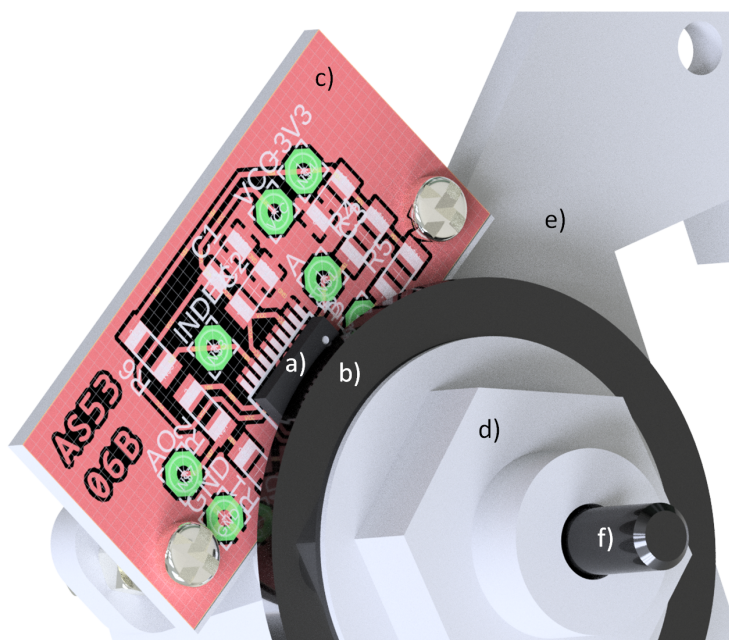
4.2 Integrace senzorů natočení předních kol

Ačkoli běžné automobily používají pro snímání natočení předních kol 1 senzor měřící natočení tyče řízení spojené s volantem, bylo v případě modelové platformy zvoleno umístění samostatného snímače pro každé z předních kol a to přímo do svislé osy otáčení. Důvodem k tomu byly nezanedbatelné vůle a nelinearity v mechanismu řízení modelu, který převádí natočení servomotoru řízení na natočení předních kol.

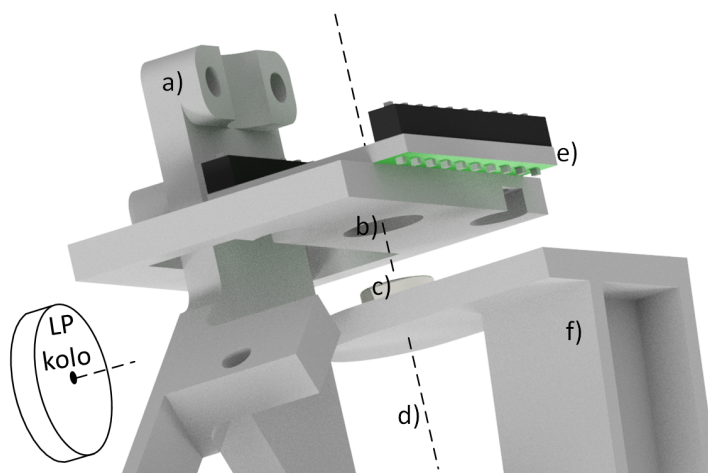
Obr. 4.1: Plošný spoj se senzorem rychlostí otáčení kol AS5306



Obr. 4.2: Umístění plošného spoje se senzorem AS5306 vedle magnetického kroužku na unašeči předního levého kola.



Obr. 4.3: Umístění senzoru natočení předního levého kola okolo svislé osy AS5048A



Tyto nepřesnosti by způsobily značnou odchylku snímaného a skutečného natočení kol, což by mělo následky při dalších výpočtech. Další výhodou použití dvojice senzorů je možnost detekce změn geometrie předních kol v závislosti na jízdní situaci. Například při prudkém brzdění může v případě modelové platformy docházet k částečnému zvýšení rozbíhavosti předních kol.

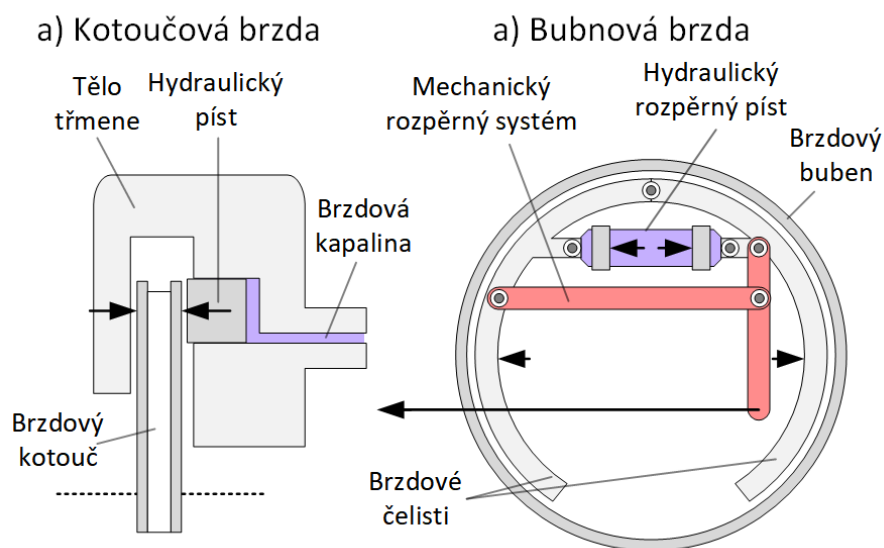
Na obrázku 4.3 můžeme vidět umístění senzoru natočení předního levého kola AS5048A, kdy je přiléhající magnet AS5000-MD6H-3 (c) spolu se svým nosičem (f) vysunut ze svého pracovního prostoru, který je představován kruhovým otvorem (b). Tento kruhový otvor slouží k zajištění stabilní osy otáčení magnetu vůči plošnému spoji se senzorem. Dále je zde vidět a) hlavní díl zavěšení předního kola, d) svislá osa natáčení předního kola, e) univerzální plošný spoj se senzorem AS5048A.

4.3 Samostatné brzdy kol

Při návrhu brzd kol byly uvaženy 2 možné konstrukční řešení: Bubnová a kotoučová brzda. Brzdnou plochou bubnové brzdy je vnitřní plocha brzdového bubnu, na kterou silově působí z vnitřní strany brzdové obložení. Jednu z možnou konfigurací můžeme vidět na obrázku 4.4 b). Bubnové brzdy dosahují vyšší efektivity brzdné síly ve smyslu, že poměr výsledného brzdného momentu ku síle působící na brzdové obložení je vyšší, než v případě kotoučových brzd. Jejich další výhodou je možnost efektivního využití vnitřního prostoru kola, kdy se brzdové čelisti nachází blízko obvodu kola a nechávají tudíž dostatek místa pro senzor úhlové rychlosti. Kvůli obtížné realizaci třecích ploch z jiného než plastového materiálu na vnitřní straně kol však byla zvolena kotoučová brzda, jejíž schéma je vidět na obrázku 4.4 a).

Třecí plochou kotoučové brzdy jsou boční strany kotouče, na které dosedají brz-

Obr. 4.4: Zjednodušené schéma kotoučové a bubnové brzdy automobilu.

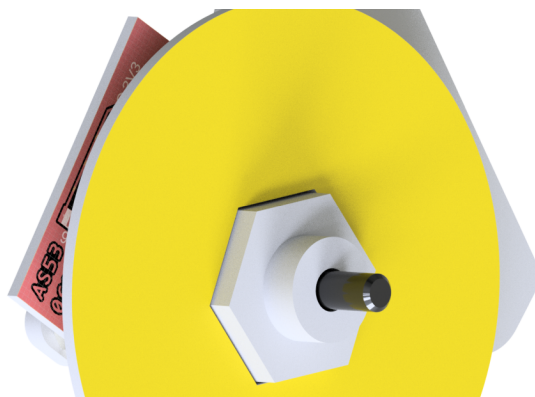


dové destičky. S rostoucí silou působící na brzdové destičky roste brzdný moment generovaný kotoučovou brzdou. Při brzdění by za účelem rovnoměrného namáhání brzdových destiček a kotouče měly být síly působící na brzdové destičky v ose kotouče stejně velké, opačně orientované. Toho je možné dosáhnout zajištěním symetrického chodu brzdových destiček, plovoucím uchycením třmene nebo plovoucím uchycením kotouče. V běžných automobilech je toto díky hydraulickému přenosu tlaku zajištěno kombinací prvních 2 způsobů. V prvních verzích kotoučových brzd byla zvolena metoda pevně uchyceného brzdového kotouče a plovoucího třmenu. Ačkoliv toto řešení fungovalo, bylo konstrukčně velmi složité a jeho mechanická odolnost byla rovněž nevýhodou.

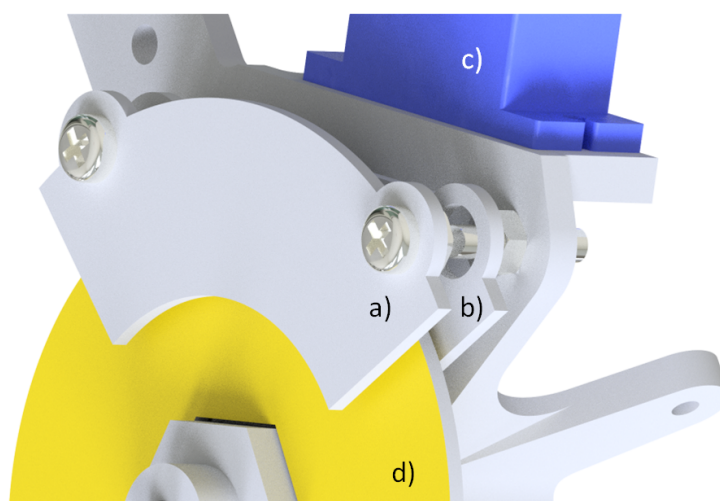
Další verze kotoučových brzd již spoléhala na volně uchycený brzdový kotouč, podobně jako ojedinělé případy kotoučových brzd rádiem řízených modelů větších měřítek. V této konfiguraci může být jedna z brzdových destiček vůči zbytku vozidla statická, což je velmi výhodné pro umístění na vnější straně kotouče ze strany brzděného kola. Plovoucí spojení mezi nábojem kola pevně připojeném ke kolu a brzdovým kotoučem je realizováno hexagonálním unašečem a odpovídajícím otvorem v brzdovém kotouči, což je vidět na obrázku 4.5. Šestiúhelníkový tvar zamezí vzájemnému protáčení brzdového kotouče a kola a rovněž umožní přirozené vystředění kotouče a tedy i stejné zatížení obou brzdových destiček během brzdění

Vnější poloměr brzdového kotouče byl zvolen co nejvyšší tak, aby při provozu na rovných hladkých plochách nedocházelo k jeho kontaktu se zemí. Při poloměru kola $r_{kola} = 33\text{mm}$ byl zvolen poloměr kotouče $r_{disc} = 30\text{mm}$ s rezervou 3mm pro vůli plovoucího uchycení kotouče a případné menší překážky na podložce.

Obr. 4.5: Plovoucí uchycení brzdového kotouče na hexagonálním unašeči kola modelové platformy.



Obr. 4.6: Výsledná sestava brzdy kola modelové platformy.

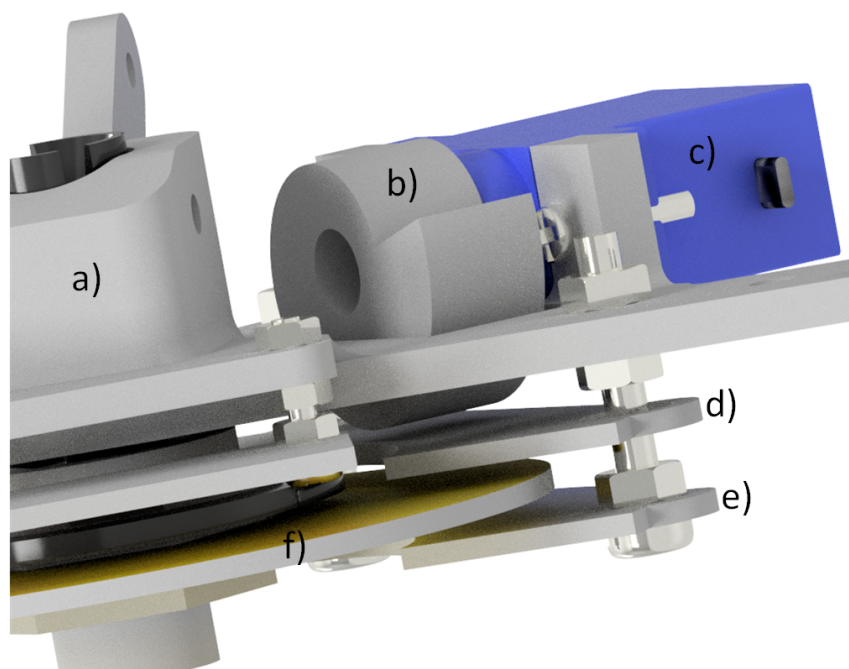


Jako materiál brzdového kotouče modelu byl zvolen materiál pro výrobu plošných spojů, oboustranně poměděný Cuprexтит. Jeho hlavní výhodou je snadná zpracovatelnost bez strojového vybavení a poměrně vysoká tepelná odolnost. Vnitřní izolační vrstvou materiálu je laminát sestávající ze skelné tkaniny napuštěné epoxidovou pryskyřicí. S teplotou skelného přechodu 135°C představuje tento materiál pro činnost brzdy omezení, ovšem pro účely testování s dostatečnými časy pro chlazení je dostatečný.

Za materiál třecích ploch brzdových destiček byla zvolena kombinace korku a překližky. Výhodou korku je jeho vysoká teplotní odolnost a překližka byla zvolena kvůli její malé prostorové náročnosti.

Jako zdroj síly a potažmo tlaku brzdových destiček byly zvoleny modelářské servomotory typu SG-90, které jsou vidět na obrázku 4.6c), kde je rovněž vidět umístění a) statické brzdové destičky, b) pohyblivé brzdové destičky a d) brzdového kotouče

Obr. 4.7: Detail umístění excentrického dílu v sestavě kotoučové brzdy

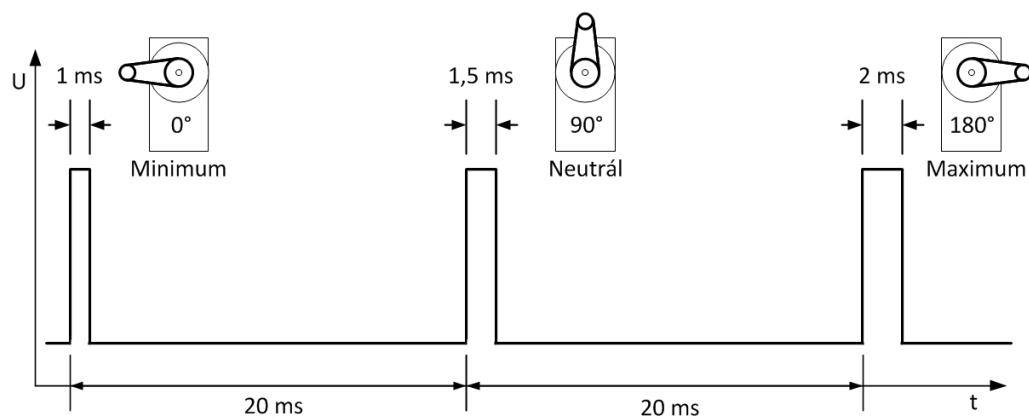


v závěsu levého předního kola modelové platformy. Servomotory SG-90 umožňují v tovární konfiguraci rotační pohyb výstupní osy v rozsahu 180° . Pro ovládání servomotoru mikrokontrolérem je použita pulzně-šířková modulace PWM s frekvencí 50Hz, jejíž průběh je zobrazen na obrázku 4.8. Z hlediska použití SG-90 v brzdách jsou nejzajímavějšími parametry provozní rychlost $0,1s/60^\circ$ a maximální moment $1,8\text{kg cm} = 0,18\text{Nm}$ ¹.

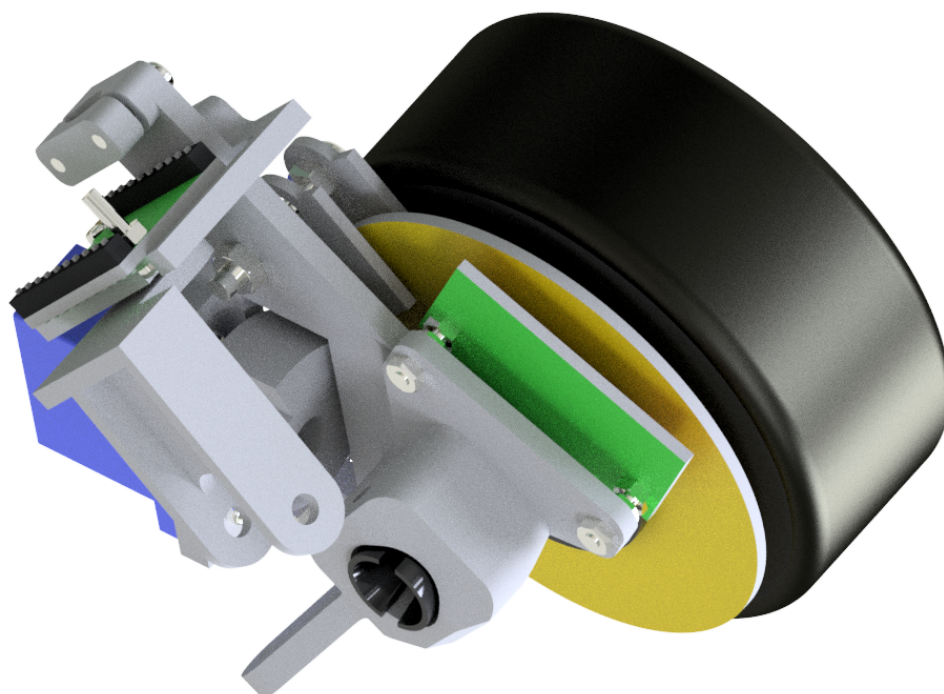
Pro transformaci rotačního pohybu osy servomotoru na lineární pohyb brzdové destičky byl použit rotační díl s lineárně proměnným poloměrem, tzv. excentr, viz. obr. 4.7b). Dále je na tomto obrázku vidět a) hlavní díl zavěšení předního kola, c) servomotor SG-90, d) pohyblivá brzdová destička, e) statická brzdová destička, f) brzdový kotouč. Toto řešení zajišťuje poměrně velkou výslednou sílu působící na brzdovou destičku. Nevýhodou ovšem je hystereze, která je způsobena třením mezi excentrickým dílem a brzdovou destičkou jak při přibrzdování, tak při odbrzdování.

¹<http://www.towerpro.com.tw/product/sg90-7/>

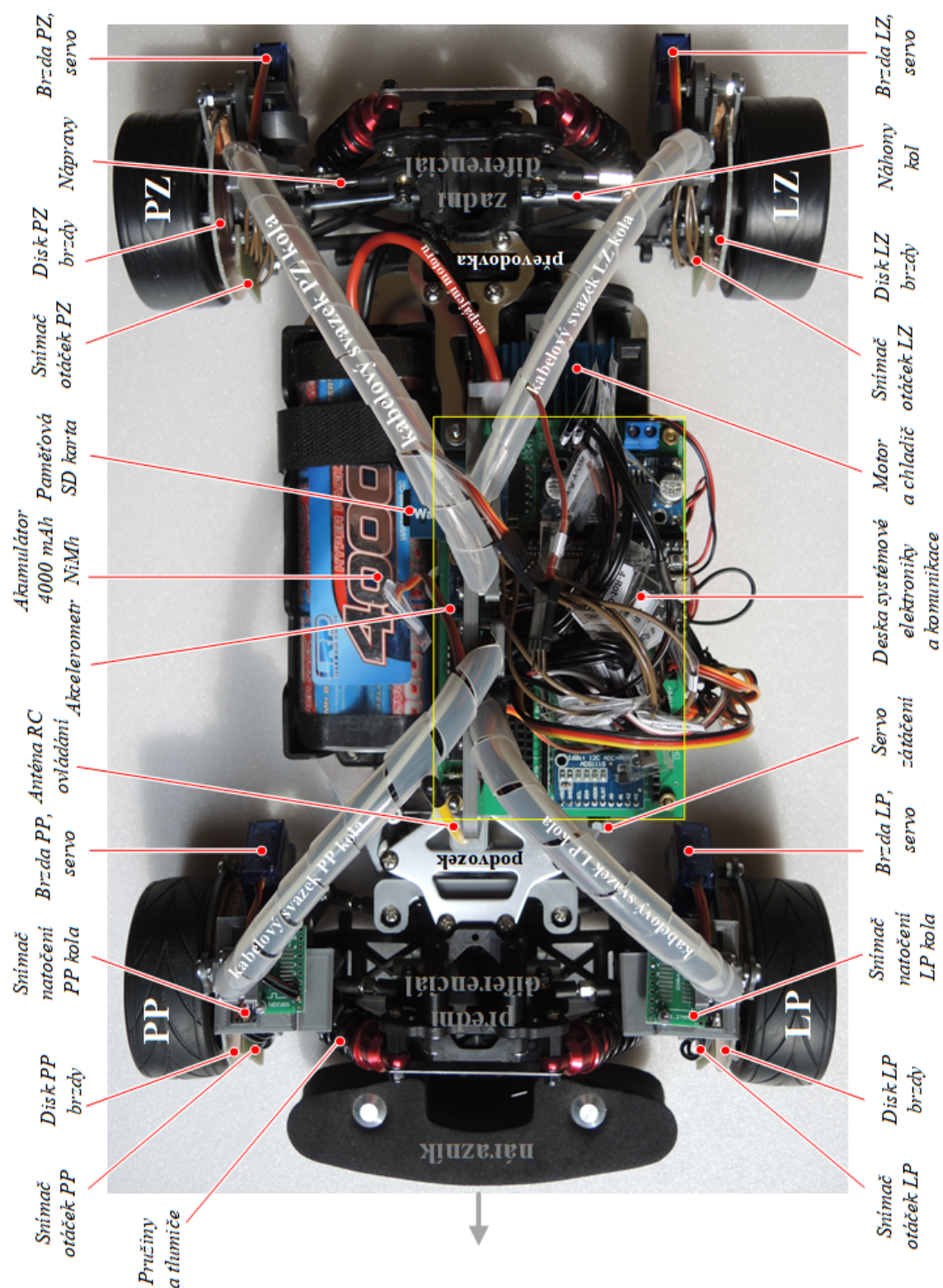
Obr. 4.8: Schéma časového průběhu řídicích pulzů PWM servomotoru.



Obr. 4.9: Hotová sestava zavěšení levého předního kola.



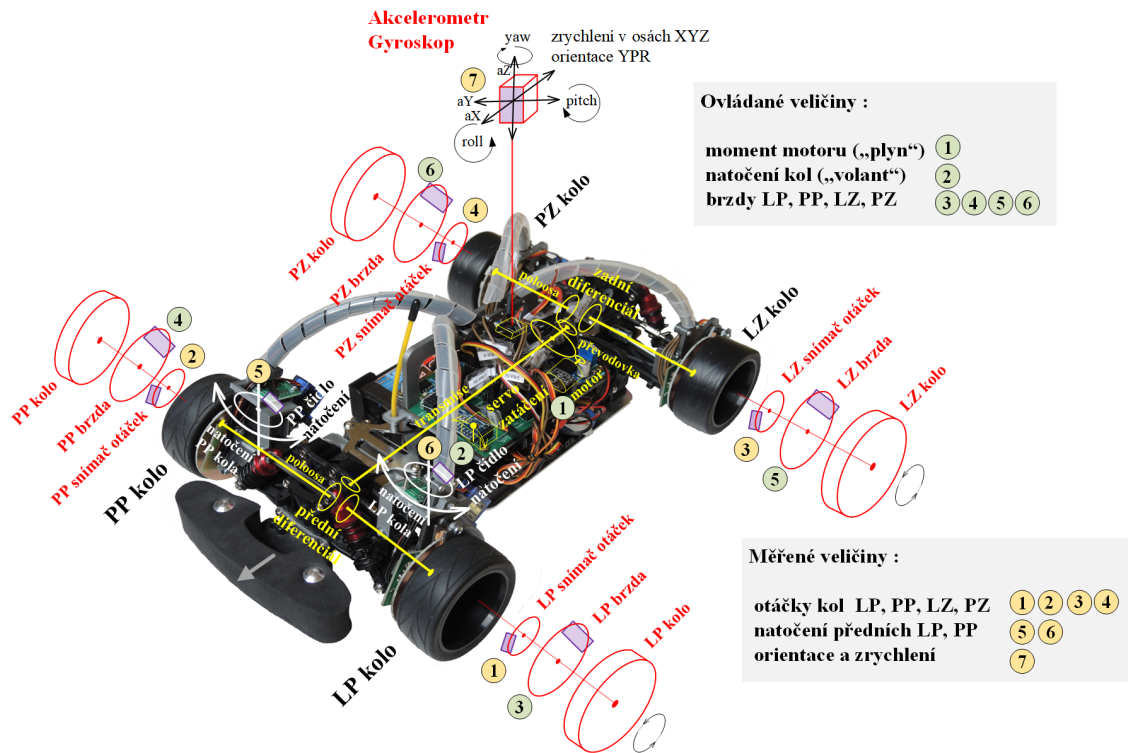
Obr. 4.10: Modelová platforma kompletně osazená otáčkoměry, senzory natočení kol i brzdami.



5 ZPROVOZNĚNÍ FUNKČNÍCH PRVKŮ MODELOVÉ PLATFORMY

Podstatnou částí tvorby modelové platformy byla integrace všech funkčních prvků, zejména senzorů a aktuátorů, do jednoho centrálně řízeného celku. Přehled veličin měřených senzory a řízených aktuátory je vidět na obrázku 5.1.

Obr. 5.1: Přehled měřených a ovládaných veličin na modelové platformě



5.1 Mikrokontrolér

Jako hlavní mikrokontrolér modelové platformy byl zvolen ESP32 šanghaiské firmy Espressif Systems ve vývojovém kitu ESP32-DevKitC. Tento mikrokontrolér, který byl poprvé uveden v září 2016, je poměrně nový a ne všechny funkce jsou ve vývojovém API již implementovány. Přesto poskytl k tomuto využití v modelové platformě řadu důvodů[12]:

- Pokročilá konektivita s podporou IEEE 802.11b/g/n včetně Bluetooth v4.2
- Vysoký výpočetní výkon díky dvoujádrovému procesoru Xtensa LX6 se standardní frekvencí hodin 160MHz
- Podpora čítání hran vstupních signálů pomocí modulu "Pulse Counter" bez činnosti procesoru

- Široká výbava komunikačními sběrnici I²C, SPI, a AD převodníky
- Aktivní komunita uživatelů a vývojářů
- Příznivá cena (přibližně 8USD)

Pro programování mikrokontroléru ESP32 byl zvolen oficiální "framework" výrobce Espressif IoT Framework, čili zkráceně ESP-IDF¹. Tento "framework" je založen na jazyce C a operačním systému reálného času FreeRTOS. Pro vývoj programu byl zvolen textový editor Visual Studio Code s rozšířením PlatformIO zaměřeným na vývoj IoT aplikací. S aktuální podporou okolo pěti set vývojových kitů v sobě PlatformIO integruje i "toolchain" potřebný pro programování ESP32.

Pro čtení dat ze senzorů a vydávání povelů pro aktuátory byla vytvořena v rámci FreeRTOS samostatná úloha ("task"). Spouštění této úlohy bylo nastaveno s konstantní periodou, aby měření dat i výpočty budoucích regulátorů probíhaly se stabilním vzorkováním. Ačkoliv FreeRTOS obsluhuje jednotlivé úlohy ("task") s periodou 1ms, nejnižší perioda hlavní úlohy, pro kterou byla měřená perioda ještě stabilní, byla nastavena na 12ms, čemuž odpovídá frekvence vzorkování 83,33Hz.

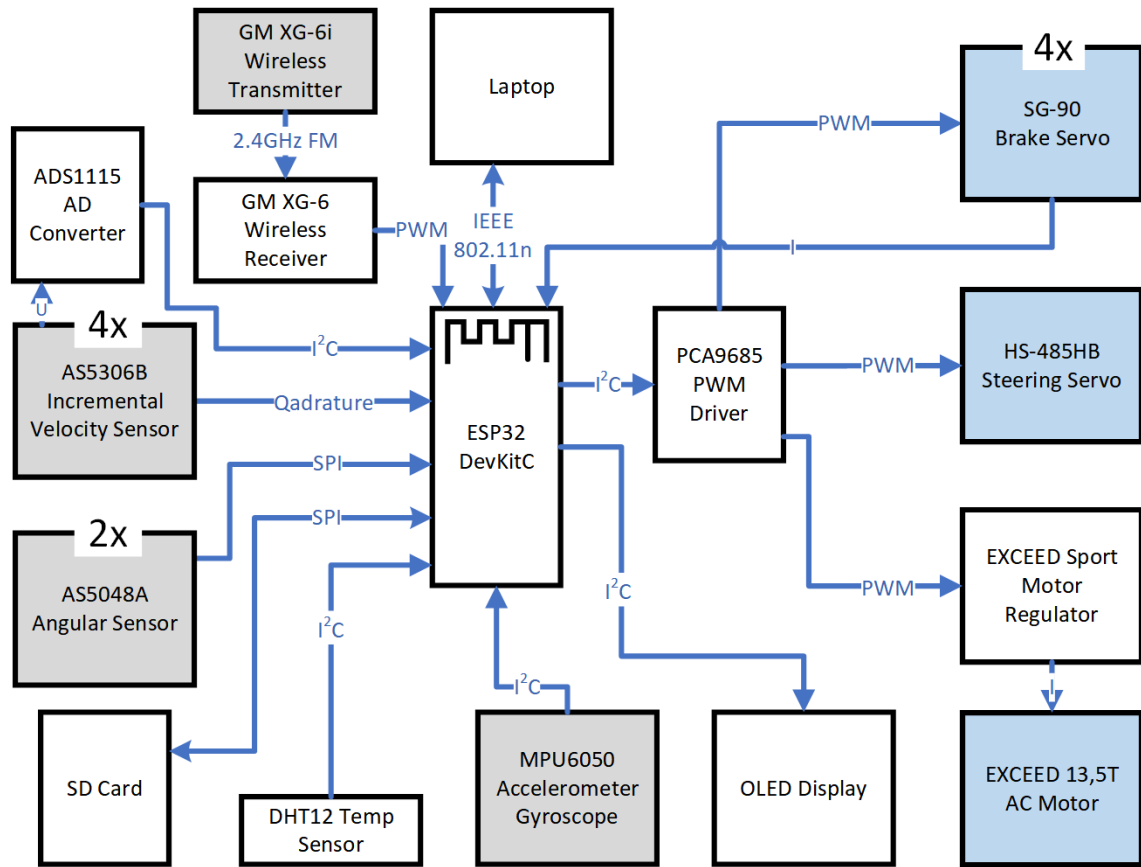
Ačkoliv je výchozím programovacím jazykem "framework" ESP-IDF jazyk C, byl nakonec hlavní soubor programu psán v jazyce C++, protože je takto možné některé úkony provádět jednodušeji a problémy s kompatibilitou knihoven ESP-IDF byly řešitelné.

Na obrázku 5.2 je vidět schéma informačního toku mezi jednotlivými funkčními komponentami modelové platformy. Zde jsou šedě označeny senzory a poskytující vstupní informace pro stabilizační systémy a modře jsou označeny aktuátory, na které jsou posílány řídicí signály od řidiče, potažmo regulátoru stabilizačního systému.

Protože má vývojový kit ESP32 DevKitC omezený počet víceúčelových vstupně-výstupních vývodů (20 GPIO), musely být použity přídavné integrované obvody, aby počet vývodů vyhověl nárokům aplikace. Omezujícím faktorem byly rovněž vlastnosti některých vývodů jako pouze vstupní, případně tzv. "strapping" vývody ovlivňující režim startu ESP32. Pro rozšíření počtu PWM výstupů byl použit LED ovladač PCA9685, který s 12 bitovým rozlišením dokáže regulovat šířku pulzu pro regulaci jasu LED, což lze použít pro generování PWM signálu pro řízení servomotorů a regulátoru otáček motoru. Nutno dodat, že 12 bitových 4096 hodnot odpovídá rozsahu od nulové po plnou střihu a pro délku pulzu PWM v rozsahu 1 až 2ms s periodou 20ms odpovídá přibližně 205 (5.1) hodnotám na celý rozsah. Z hlediska přesnosti servomotorů a regulátoru otáček motoru se přesto nejedná o omezující faktor. PCA9685 je k ESP32 připojen pomocí I²C sběrnice, takže samo nezabírá žádný GPIO a zároveň poskytuje 16 samostatných PWM výstupů, ze kterých je v případě

¹<https://github.com/espressif/esp-idf>

Obr. 5.2: Schéma informačního toku modelové platformy.



modelové platformy v plánu využít zatím pouze 6.

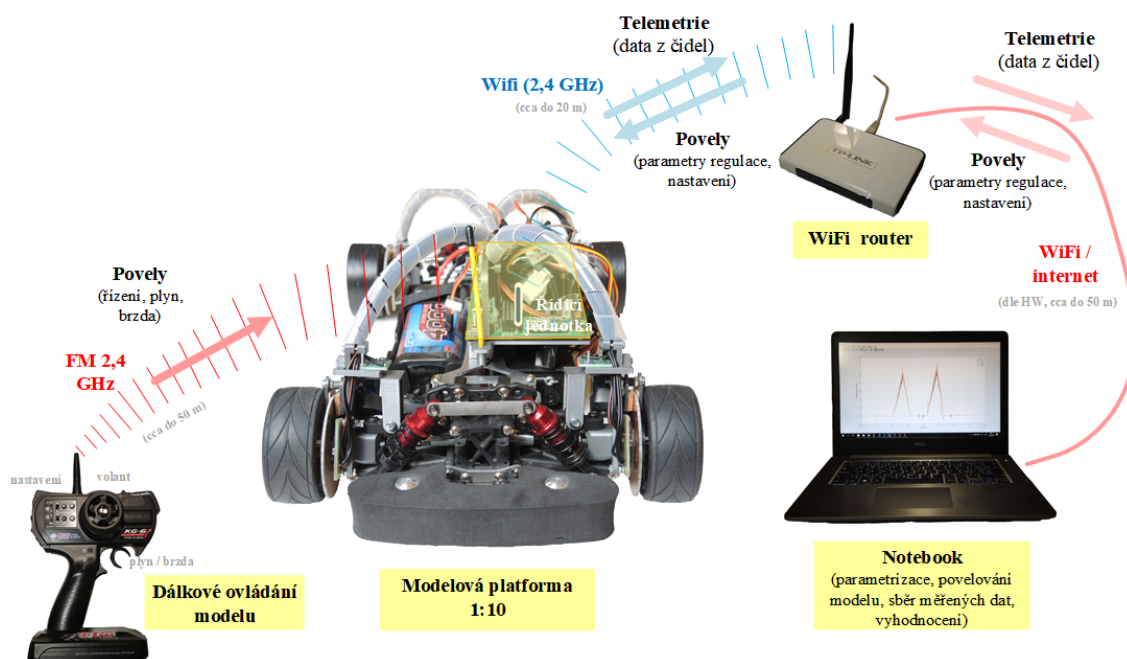
$$\frac{2^{12}}{20} \approx 205 \quad (5.1)$$

Dalším integrovaným obvodem pro rozšíření počtu použitelných vývodů byl ASD1115, který poskytuje čtyři 16 bitové AD převodníky. Ty jsou ve výsledném návrhu použity pro monitorování stavu magnetického pole v okolí inkrementálních senzorů otáčení kol a tedy jejich vzdálenosti od magnetického kroužku. Pro komunikaci obvodu je opět použita I²C sběrnice.

5.2 Vyčítání dat ze senzorů

Pro vyčítání dat z inkrementálních senzorů otáčení kol AS5306 je použito vždy po dvojici vývodů nesoucích kvadrurní signál v kombinaci s jednotkou ESP32 "Pulse Counter"(PCNT). Jedné jednotce PCNT je přiřazen vždy jeden vývod jako pulzní, který vyvolá inkrementaci či dekrementaci počítadla v registru. Druhý vývod je

Obr. 5.3: Komunikace a přenosy dat při testování a vývoji modelové platformy.



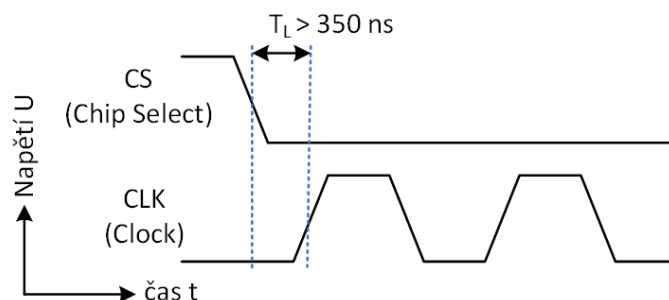
použit jako řídicí a jeho úroveň rozhoduje v kombinaci typem hrany pulzního signálu o zvýšení nebo snížení hodnoty počítadla. V současném stavu je na snímání signálu otáčení jednoho kola použita vždy jen jedna jednotka PCNT, což znamená, že čítač reaguje na hrany pouze jednoho ze vstupních signálů a je tedy dosaženo změřeného polovičního rozlišení 2880 poloh na otáčku. V případě potřeby je možné použitím dalších PCNT, kterých má ESP32 celkem 8, zvýšit rozlišení na teoretické maximum 5760 poloh na otáčku. Při testování stabilizačních systémů však k tomuto rozšíření nevznikla potřeba.

Ačkoliv senzory úhlového natočení předních kol ve smyslu zatáčení komunikují s řídicím mikrokontrolérem po sběrnici SPI, představovalo jejich zprovoznění problémy. Nepříjemnosti způsobovala implementace sběrnice SPI v ESP-IDF, ve které nebyla dodržena dostatečná časová prodleva mezi zvolením koncového SPI zařízení podržením jeho CS "Chip Select" vývodu v logické nule a vzestupnou hranou hodinového signálu CLK. V případě senzoru AS5048A je minimální délka prodlevy 350ns, viz. obr. 5.4. Toto bylo možné vyřešit až manuální obsluhou logické úrovně na výstupu CS.

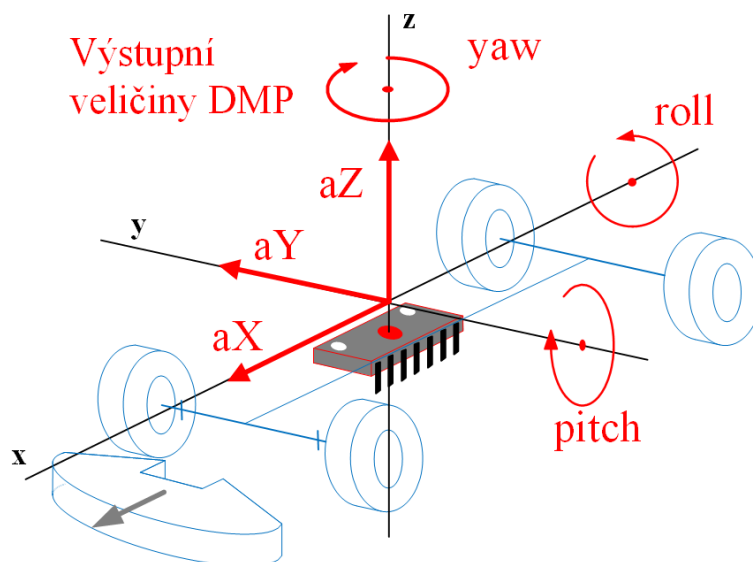
Pro obsluhu a získávání dat gyroskopu a akcelerometru MPU6050 byla použita knihovna I²Cdevlib², která zprostředkovává komunikaci různých vývojových platforem se škálou I²C zařízení. Aktuálně se součástí této knihovny stala i podpora MPU6050 pro ESP z "framework"ESP-IDF. Jako měřená data nebyla použita čistá

²www.i2cdevlib.com

Obr. 5.4: Požadavek senzoru AS5048A na časovou prodlevu mezi sestupnou hranou signálu CS a první vzestupnou hranou hodinového signálu CLK.



Obr. 5.5: Osy výstupních fyzikálních veličin DMP MPU6050



měření gyroskopů a akcelerometrů, ale výstupy z interního DMP "Digital Motion Processor", který se stará o omezení šumů a vyšší kvalit výstupních dat. Dále byly parametry použitého zařízení MPU6050 zkalibrovány na omezení odchylek měření při nulovém pohybu pomocí algoritmu, který je součástí knihovny I²Cdevlib. Na obrázku 5.5 je vidět přepočtené umístění os výstupních fyzikálních veličin DMP.

Za účelem ukládání jízdních dat pro zpětnou analýzu bylo původně uvažováno a přímo na modelu testováno použití SD "Secure Digital" karty, na kterou je možné zapisovat skrze SPI sběrnici. Praktické použití této metody se ovšem neosvědčilo z toho důvodu, že sběrnice SPI je sdílena s dalšími zařízeními (senzory natočení kol) a je tedy během jednoho jednoho cyklu hlavní úlohy programu třeba přepínat komunikaci na sběrnici mezi senzory a případně i SD kartou pro zápis. V tomto režimu, kdy je třeba SD kartu aktivovat na SPI sběrnici, načíst souborový systém, zapsat

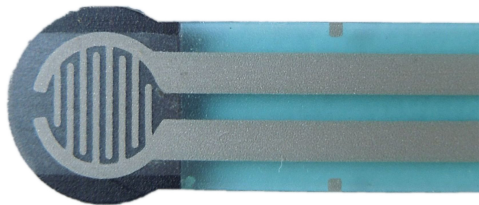
data, vše uzavřít a ukončit komunikaci, nastal zásadní problém s délkou trvání tohoto děje, která se pohybuje okolo 50ms. To je příliš dlouhá doba pro prodloužení periody hlavní úlohy programu. Proto byl tento přístup opuštěn a pro sběr jízdních dat bylo použito odesílání dat v reálném čase přes IEEE 802.11n bezdrátovou síť pomocí UDP paketů. Ty jsou na kontrolním počítači sbírány a ukládány do textového souboru v CSV formátu pro další zpracování.

5.3 Ovládání kotoučových brzd

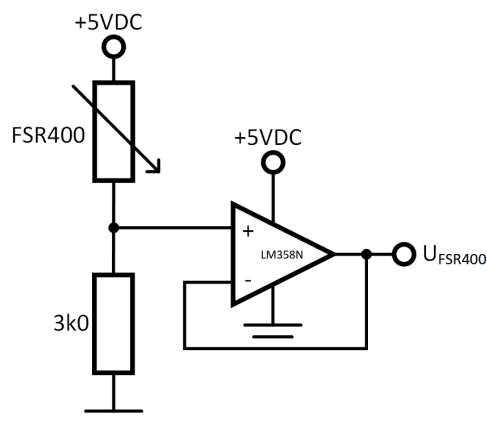
Pro analýzu průběhu síly působící na brzdové destičky v závislosti na šířce pulzu PWM signálu servomotoru byl použit senzor FSR400 americké firmy Interlink Electronics. Výhodou tohoto senzoru je jeho ploché fóliové provedení, které umožňuje měření síly přímo mezi brzdovou destičkou a kotoučem. Senzor, který je vidět na obrázku 5.6, je založen na technologii FSR "Force Sensing Resistor™", díky které s rostoucí silou klesá elektrický odpor mezi kontakty senzoru. Senzor se skládá ze 2 kruhových membrán mezi kterými je oddělovací mezikruží zajišťující tenkou vzduchovou mezeru mezi membránami v případě nulové působící síly. Na jedné z membrán je natištěn elektricky vodivý vzor podobný "zapleteným prstům". Přívodní kontakty senzoru jsou v konfiguraci pouze jedné vrstvy elektricky oddělené. Druhá membrána je ze strany přiléhající k první membráně potažena FSR uhlíkovým inkoustem. Působením síly na senzor v ose kolmé na jeho rovinu je docíleno postupnému doteku zmíněných membrán, spojení kontaktů mezi jejich výběžky a klesání vzájemného elektrického odporu. Senzor FSR400 není možné použít pro přesné měření síly, protože, jak sám výrobce zmiňuje, záleží hodnoty měřeného odporu kus od kusu a také na dané aplikaci. Zde jsou senzory použity hlavně za účelem ověření linearitu síly servomotoru působící na brzdové destičky v závislosti na šířce pulzu řízení servomotoru.

Pro měření síly bylo výrobcem doporučené zapojení s použitím napěťového děliče s omezením zátěže pomocí vysokoimpedančního vstupu operačního zesilovače v režimu sledovače, což je vidět na obrázku 5.7. Měření závislosti výstupního napětí na délce pulzu řízení servomotoru probíhalo ve dvou etapách a je zobrazeno v grafu na obrázku 5.8. Ve výchozím stavu byla brzda povolena, čemuž odpovídá délka pulzu 2ms a nulové měřené napětí U_{FSR400} . Postupnému zabrždění odpovídá červená charakteristika " U_{FSR400} Zabrždění". Během tohoto průběhu byla se skokem 20μs a periodou 200ms snižována délka pulzu PWM a průběžně odečítána hodnota výstupního napětí U_{FSR400} . V druhé etapě byla šířka pulzu zvětšována a brzda odbrždována až do původní hodnoty.

Proložení výrobcem udané charakteristiky tohoto použitého zapojení exponenciálou byla obdržena funkce 5.2 udávající vztah síly působící na senzor a výstupního

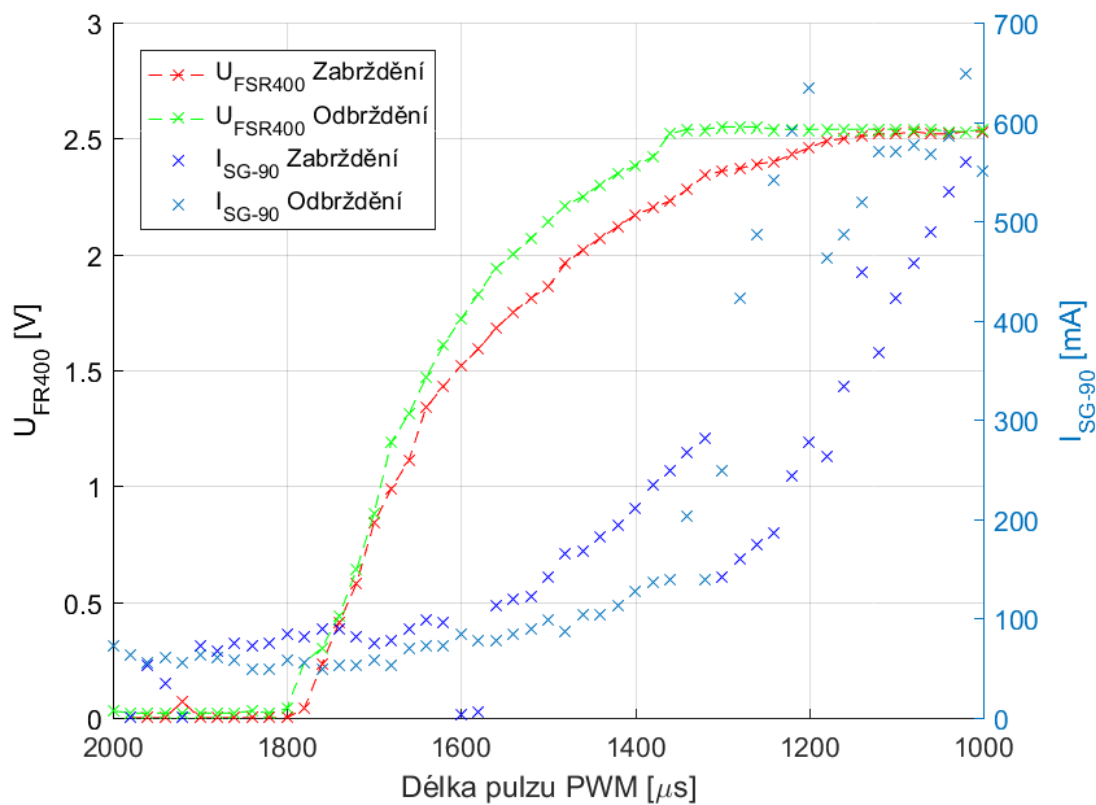


Obr. 5.6: Snímač síly FSR400.



Obr. 5.7: Schéma použitého zapojení senzoru FSR400 pro měření a nastavení síly působící na brzdovou destičku.

Obr. 5.8: Průběh výstupního elektrického napětí siloměru FSR400 v závislosti na šířce pulzu řízení servomotoru brzdy.



napětí. Bohužel tuto rovnici není možné vyjádřit ve tvaru $F_{FSR400} = f(U_{FSR400})$ a proto musela být pro přepočet použita funkce "fzero()", která iterativními výpočty hledá parametr, pro který je funkční hodnota nejbližší nule. Funkce "fzero()" je kombinací metody půlení intervalu, Newtonovy metody tečen a metody inverzní kvadratické interpolace. Pro použití příkazu "fzero()" byla původní rovnice upravena do tvaru 5.3. Pomocí těchto úprav bylo možné přepočíst měřené napětí na odpovídající sílu.

$$U_{FSR400} = 0,665 \cdot F^{0,494} \quad (5.2)$$

$$\frac{U_{FSR400}}{0,665} - F^{0,4937} = 0 \quad (5.3)$$

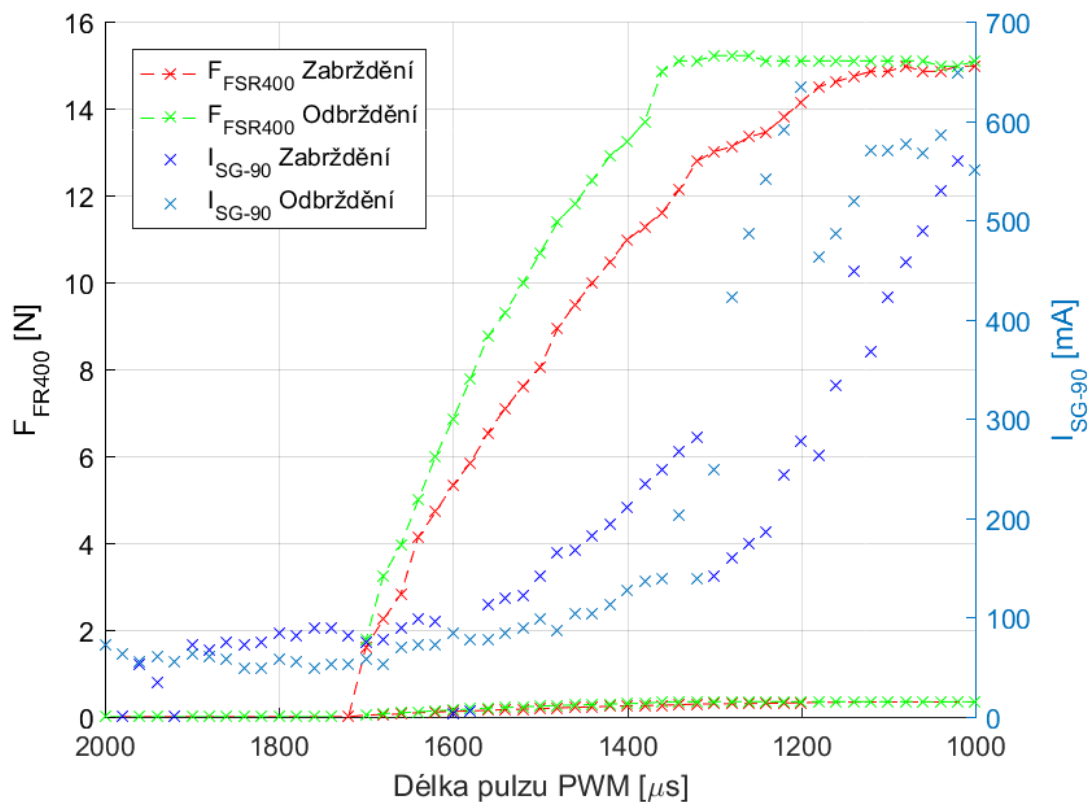
Na obrázku 5.9 je výsledná závislost velikosti působící síly na šířce pulzu servomotoru. Zajímavá věc, kterou zde můžeme vidět, je hystereze působící síly způsobená třením excentrického dílu servomotoru o vnější povrch brzdové destičky. Během zabrzďování toto tření brání nárůstu síly a při odbrzďování zase poklesu síly působící kolmo na destičku.

V prvním úseku od 2000 μ s do 1700 μ s vidíme přibližování brzdové destičky kotouči. Ve středním úseku od 1700 μ s do 1400 μ s se již destička dotýká kotouče a s rostoucí šířkou pulzu poměrně lineárně narůstá síla. Okolo 1400 μ s již začíná docházet k nasycení, kdy je dosaženo maximálního momentu servomotoru a nemůže tedy dojít k dalšímu nárůstu síly na brzdovou destičku. Po zkalibrování je každá z brzd provozována ve středním, lineárním úseku.

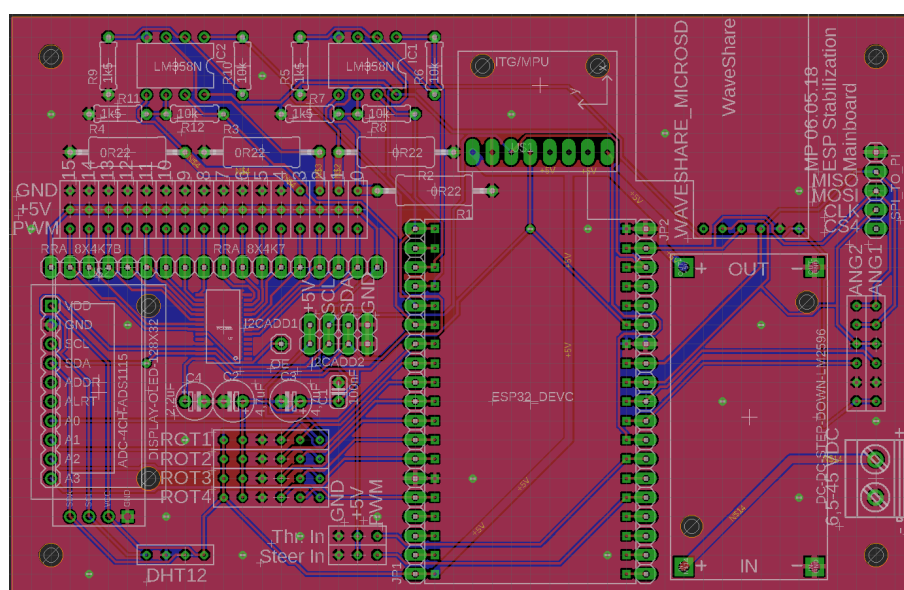
5.4 Plošný spoj pro řídicí mikrokontrolér

Pro zapojení všech elektrických funkčních prvků platformy již kvůli přílišné složitosti nebylo možné použít univerzální plošný spoj a byl proto navržen speciální plošný spoj v CAD programu Autodesk Eagle 9.0.0. Plošný spoj byl externě vyroben. Výchozí návrh oboustranného plošného spoje je vidět na obrázku 5.10 a výsledný osazený plošný spoj na obrázku 5.11.

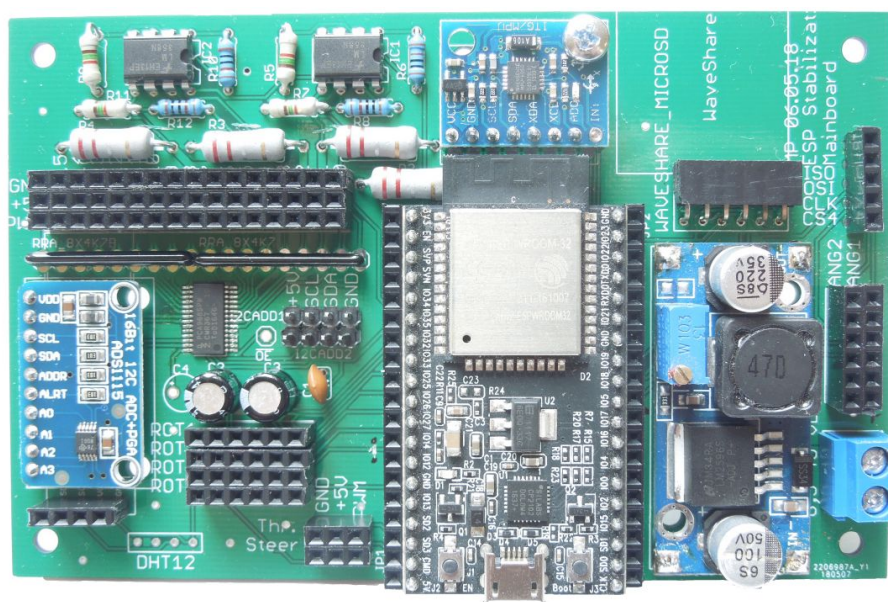
Obr. 5.9: Průběh přepočtené síly působící na brzdovou destičku v závislosti na šířce pulzu řízení servomotoru brzdy.



Obr. 5.10: Pohled na návrh plošného spoje pro řídicí mikrokontrolér ESP32.



Obr. 5.11: Pohled na osazený plošný spoj včetně ESP32 DevKitC.



6 IMPLEMENTACE STABILIZAČNÍCH SYSTÉMŮ

6.1 ABS

Při implementaci základního principu protiblokovacího systému ABS bylo nejprve přistoupeno k regulaci brzdného momentu kol přední nápravy s určením referenční rychlosti vozidla z obvodové rychlosti zadních nebrzděných kol. Z referenční rychlosti je počítán skluz předních kol λ , který slouží jako vstup do regulátoru. Pro regulaci brzdné úrovně aplikované na přední kola byl použit zatím výchozí dvoustavový regulátor lineárně zvyšující nebo snižující úroveň brzdění na daném kole.

Na obrázku 6.1 je vidět průběh rychlosti otáčení všech kol během brzdného manévru s předními brzděnými a zadními nebrzděnými koly. Ačkoliv model vozidla zpomaloval lineárně, je na hodnotách obvodové rychlosti zadních kol vidět kolísání způsobené odporem kladeným elektrickým motorem přímo spojeným se zadními koly. Z průběhu otáček předních kol je vidět, že dochází k jejich periodickému zastavování a roztáčení, podobně jako u systému ABS na skutečném automobilu. Značným rozdílem mezi koly skutečného automobilu a koly modelové platformy je v momentu setrvačnosti, které je v případě malých kol velmi malý a dovolí rychlou a snadnou blokaci brzděného kola.

Na obrázku 6.2 je vidět úroveň brzdění žádaná řidičem a úroveň brzdění aplikované na přední kola. Současný regulátor kmitá s frekvencí přibližně 6Hz, což je hodnota srovnatelná se systémem ABS skutečného auta, kde se frekvenci kmitů pohybuje okolo 10Hz. Hlavním důvodem nízké dosažené frekvence kmitů regulátoru je omezená reakce servomotorů brzd modelu na změnu žádané brzdné úrovně.

6.2 Vyhodnocení vlivu parametrů senzorů na kvalitu ABS

V případě použití senzorů rychlosti otáčení kol s prodlevou, například inkrementální senzory s nízkým rozlišením při malých rychlostech, je zpoždění měřených dat připočteno k času reakce brzdy a je tudíž možné dosáhnout horší kvality regulace ABS. Aktuálnost dat rychlosti otáčení kol (minimální zpoždění) je tedy pro protiblokovací systém ABS hlavním kritickým parametrem.

6.3 ASR/TCS

Pro testování protipokluzového stabilizačního systému ASR byla hnaná kola modelu vozidla obalena plastovou páskou za účelem snížení součinitele smykového tření mezi

kolem a podložkou pro simulování náročných jízdních podmínek.

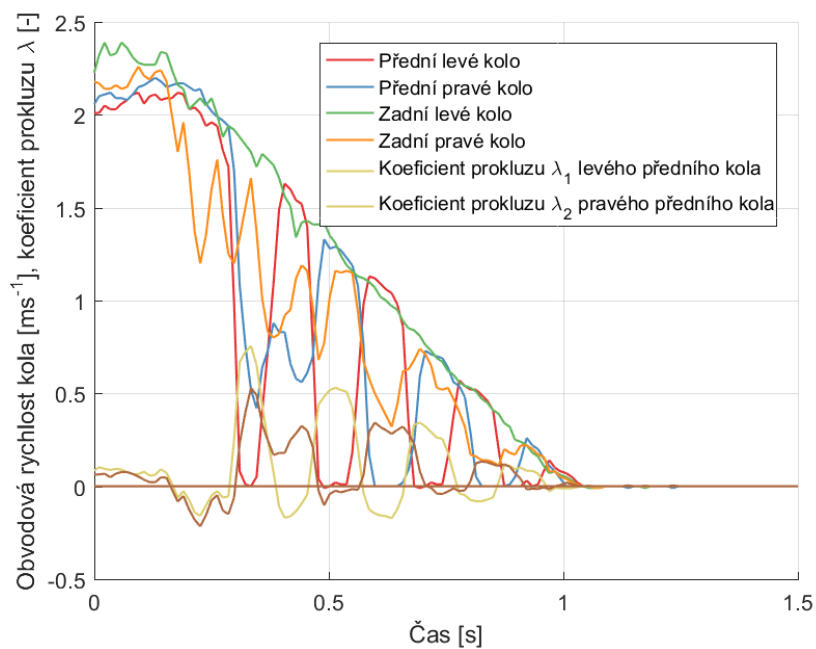
Bez použití omezení hnacího momentu na kolech byla naměřena charakteristika zobrazená v grafu na obrázku 6.3. V tomto grafu je zobrazena časová závislost obvodových rychlostí jednotlivých kol během akcelerace z nulové rychlosti. Můžeme si všimnout, že od momentu roztočení zadních hnaných kol je jejich obvodová rychlost mnohem vyšší, než předních nehnaných kol. Souhrnný koeficient prokluzu λ počítaný z jednotlivých náprav se během akcelerace pohyboval okolo hodnoty $-1,5$, což mělo za následek, že součinitel smykového tření hnaných kol ve směru kolmém na směr jízdy byl velmi malý a jejich schopnost vedení vozidla byla velmi omezena. Následkem byl nejdříve řízený a později neřízený smyk. Okolo času $1,5s$ došlo k vybočení vozidla okolo osy Z (YAW) v záporném směru, čemuž odpovídá dočasné zpomalení levého předního kola oproti pravému, které bylo následně vyrovnáno řidičem korekcí řízení. Okolo $3,5s$ od začátku průběhu došlo již k tak velkému vybočení okolo osy Z, že již nebylo možné jej vyrovnat korekcí řízení, a vozidlo se otočilo přibližně o 180° v kladném smyslu (YAW) a do klikového stavu došlo pozpátku. Tento průběh zobrazuje velmi nežádoucí chování vozidla.

Na obrázku 6.4 je vidět obdobná jízdní situace, ovšem s rozdílem v použití regulace hnacího momentu na kolech zadní hnané nápravy za účelem udržení koeficientu prokluzu λ okolo limitní hodnoty $-0,2$. Jedná se tedy o použití části ASR odpovídající regulátoru rychlosti hnané nápravy. K řízení momentu motoru byl použit zatím jednoduchý dvoustavový regulátor, což má za následek kmity obvodové rychlosti hnaných kol stejně jako regulované veličiny λ . I přesto byl rozjezd z použitým regulátorem stabilnější a žádné korekce řízení řidičem nebyly za účelem udržení přímého směru potřeba.

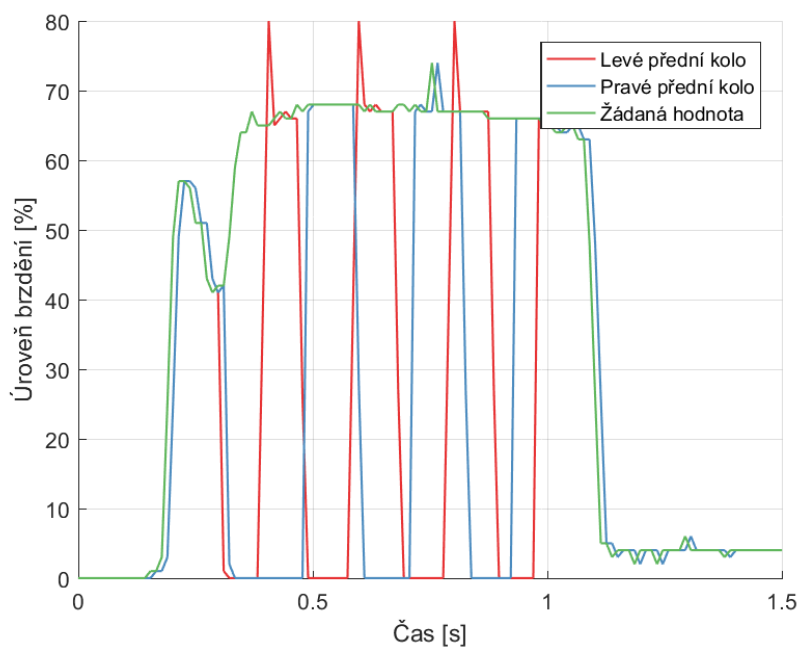
6.4 Vyhodnocení vlivu parametrů senzorů na kvalitě ASR/TCS

Při zkoumání vlivu parametrů senzorů rychlosti otáčení kol na kvalitu regulace ASR bylo dospěno k závěru, že kritickým parametrem je minimální detekovatelná rychlost otáčení kol. Momenty, kdy je protiprokluzová regulace za účelem zvýšení trakce nejvíce potřeba nastávají právě při nízkých otáčkách. Z tohoto důvodu jsou pasivní indukční senzory z hlediska stabilizačních systémů nevhodné a jsou dnes zpravidla používány senzory aktivní.

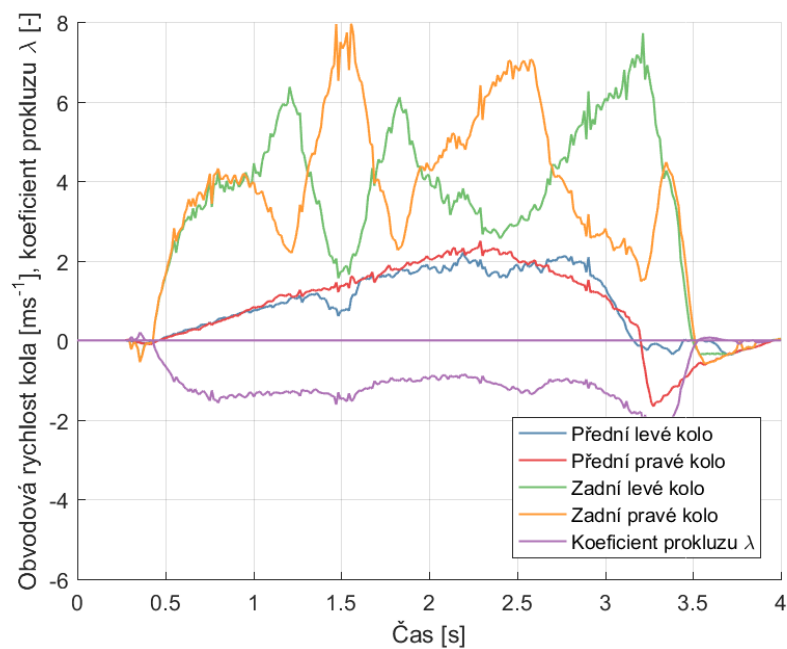
Obr. 6.1: Průběh obvodových rychlostí kol vozidla s přední brzděnou nápravou během regulovaného brzdění (ABS aktivní).



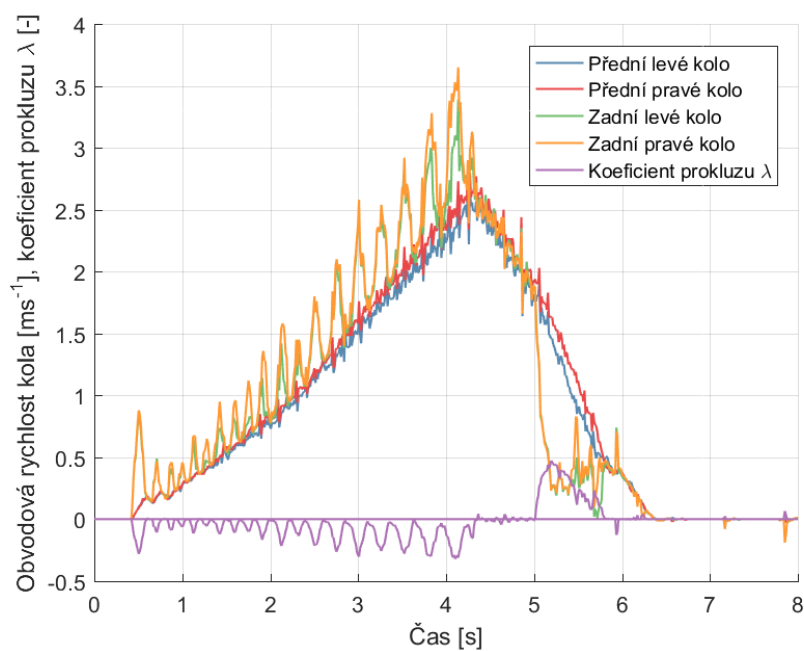
Obr. 6.2: Průběh úrovně brzdění jednotlivých kol vozidla s přední brzděnou nápravou (ABS aktivní).



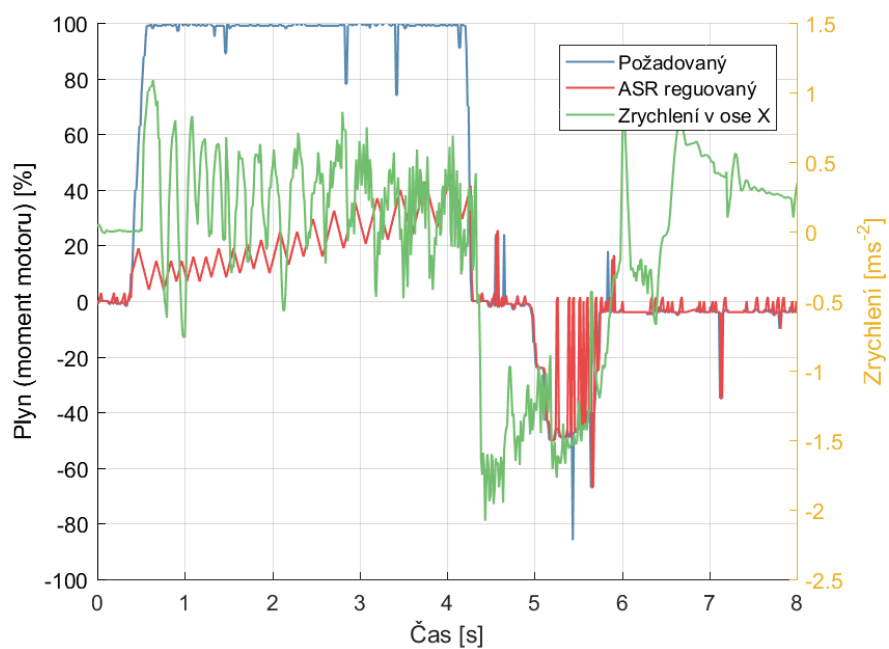
Obr. 6.3: Průběh obvodových rychlostí kol vozidla se zadní hnanou nápravou během neregulovaného rozjezdu (ASR pasivní).



Obr. 6.4: Průběh obvodových rychlostí kol vozidla se zadní hnanou nápravou během regulovaného rozjezdu (ASR aktivní).



Obr. 6.5: Průběh obvodových rychlostí kol vozidla se zadní hnanou nápravou během regulovaného rozjezdu (ASR aktivní).



7 ZÁVĚR

Předložená práce zpracovává přehled asistenčních systémů řidiče se zaměřením na jízdní stabilitu vozidel, princip jejich funkce a používané senzory. Jednotlivé typy snímačů jsou hodnoceny z hlediska výhod, nevýhod, možností použití a nároků. V dostupné literatuře nejsou nároky na senzory použité pro stabilizaci vozidla diskutovány, proto bylo třeba vytvořit fyzický model k demonstraci stabilizačních systémů a otestování jejich nároků na senzory.

Velká část práce je věnována tvorbě modelové platformy vozidla v měřítku 1:10, kde jsou realizovány a implementovány jednotlivé typy senzorů a měřeny potřebné fyzikální veličiny v průběhu testovacích jízd. Data z čidel jsou zpracovávána v demonstrační verzi vybraných stabilizačních systémů (ASR, ABS) a jsou zde analyzovány vlivy kvality snímaných dat na činnost těchto systémů.

Vývoj stabilizačních systémů je v praxi značně dlouhodobý a je přímo spjat s hlavními výrobci automobilové techniky, kteří praktické detaily stabilizačních systémů vyvíjejí pouze interně a speciálně pro své modely vozů. Je tedy vzhledem k rozmanitosti systémů stabilizace obtížné stanovit konkrétní požadavky na použité senzory. Je ovšem možné zkoumat vliv kvality různých parametrů snímaných dat na základní implementaci stabilizačních systémů a stanovit kritické parametry.

Současné množství používaných asistenčních systémů ve vozidlech je značně rozsáhlé a počet měřených veličin i senzorů je velký a vzájemně provázaný. Z hlediska hlavních vlastností senzorů je dle rozboru požadována:

- Dlouhodobá spolehlivost provozu snímačů i při náročných podmínkách provozu vozidla, a to i za extrémních klimatických situací
- Velký rozsah měření veličin jízdních dat
- Rychlá odezva systému měření na nastalou jízdní situaci
- Dlouhodobá stálost parametrů měření
- Jednoduchost vestavby a ekonomika řešení použitých snímačů

V rámci práce byla vytvořena speciální modelová platforma umožňující široké testování a také další vývoj stabilizačních systémů. Mezi práce provedené na platformě patří:

- Úprava podvozku modelu vozidla s náhradou řady dílů pro integraci měření veličin čidly, a to s velkým využitím 3D tisku
- Zástavba velmi přesných senzorů otáčení do všech kol modelu
- Integrace přesných magnetických senzorů úhlů natočení obou předních kol
- Vývoj a konstrukce nezávislých elektromechanických brzd na všech kolech s možností jejich kalibrace
- Integrace senzoru orientace modelu v prostoru a jeho zrychlení pro měření ve

všech potřebných osách

- Sběr měřených dat ze všech senzorů na různých úrovních komunikace a jejich zpracování v centrálním mikrokontroléru
- Komunikace centrální jednotky s řízením modelové platformy
- Bezdrátový přenos měřených dat v reálném čase pomocí WiFi sítě do kontrolního PC, kde jsou data dále analyzována
- Vývoj a otestování základních systémů stabilizace (ASR, ABS) s využitím různě volené kvality (parametrizace) měřených veličin z čidel.

Celkově se podařilo zpracovat provázanou platformu 1:10, na které je možné testovat za různých jízdních režimů velmi přesné měření provozních hodnot z čidel, jejich nastavení a přenos v reálném čase pro analýzu a návrh různě orientovaných asistenčních systémů.

Z analýzy snímačů pro asistenční systémy vozidla na modelové platformě lze shrnout tyto zjištěné poznatky:

- Testovaná čidla, měřené veličiny i vyvíjené algoritmy asistenčních systémů je třeba testovat opakovaně, a to za různých podmínek (povrchy, jízdní režimy), protože úspěšnost asistenčního systému při jednom testu neznamena úspěšnost i za jiných podmínek
- I při důsledné teoretické přípravě a rozboru se ukazuje, že nastavení asistenčních systémů vozidla je vázáno na specifika dané fyzické realizace (v tomto případě modelové platformy) a některé parametry je třeba modifikovat až dle konkrétních testů a jízdních režimů
- Kritickým parametrem senzorů rychlosti otáčení kol je jejich nejnížší měřitelná rychlost otáčení, případně jejich přesnost při nízkých rychlostech, což má zásadní vliv na kvalitu protipokluzové regulace ASR při rozjezdu vozidla
- Důležitým parametrem senzorů rychlosti otáčení kol je doba odezvy (časové zpoždění) výstupní veličiny na změnu vstupní rychlosti, která zhoršuje možnosti regulace protiblokovacího systému ABS i protipokluzového systému ASR.

Z hlediska potenciálního pokračování prací v této oblasti lze doporučit:

- Implementace pokročilejších funkcí stabilizačních systémů
- Testování stabilizačních systémů v různých jízdních podmínkách jako stav a geometrie vozovky, zatížení vozidla, povětrnostní podmínky
- Ověření chování modelové platformy pomocí teoretického modelu
- Prozkoumání možností zvýšení frekvence regulační smyčky nad 1kHz
- Testování alternativních stabilizačních algoritmů s využitím širokých možností měření jízdních veličin pomocí čidel na modelové platformě
- Zkoumání chování stabilizačních systémů při poruchách vozidla
- Podrobnější zpracování rozsáhlých změřených jízdních dat z čidel.

LITERATURA

- [1] Alena Høye, The effects of Electronic Stability Control (ESC) on crashes - An update, *Accident Analysis & Prevention*, Volume 43, Issue 3, 2011, Pages 1148-1159, ISSN 0001-4575, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.12.025>.
- [2] From innovation to standard equipment 30 years of safe braking with Bosch ABS « Press Info « Bosch in Japan. Document Moved [online]. Dostupné z: <https://www.bosch.co.jp/en/press/group-0807-05.asp>, cit. 14.05.2018
- [3] HEISSING, Bernd a Metin ERSOY. Chassis handbook: fundamentals, driving dynamics, components, mechatronics, perspectives. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011. ISBN 978-3-8348-0994-0.
- [4] M. Massimiliano et al., "Inertial sensors rapid prototyping for automotive application," 2007 2nd International Workshop on Advances in Sensors and Interface, Bari, 2007, pp. 1-5.
- [5] REIF, K. Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems. Springer, Wiesbaden, 2014. ISBN 978-3-6-8-03977-6
- [6] ROBERT BOSCH GMBH (ED.). Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics Systems and Components, Networking and Hybrid Drive. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2013. ISBN 9783658017835.
- [7] Vlk, F.: Automobilová elektronika 1. Asistenční a informační systémy, 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, ISBN 80-239-6462-3, 2006
- [8] W. J. Fleming, "Overview of automotive sensors," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 1, no. 4, pp. 296-308, Dec 2001.
- [9] Y. Chen, Y. Wu, M. Yang and J. Liu, "Study on sliding mode control of vehicle ABS with fractional exponential approach law," 2017 Chinese Automation Congress (CAC), Jinan, 2017, pp. 3031-3034.
- [10] ZANTEN ROBERT, Anton T. van a ROBERT BOSCH GMBH. Evolution of Electronic Control Systems for Improving the Vehicle Dynamic Behavior. , 9s.
- [11] ADXRS300 Datasheet www.analog.com
- [12] ESP32 Datasheet www.espressif.com
- [13] MPU6050 Datasheet www.invensense.com

SEZNAM VYBRANÝCH SYMBOLŮ VELIČIN A ZKRATEK

ABS	z angl. Anti-lock Braking System, popř. něm. AntiBlockierSystem, stabilizační systém vozidla zabraňující blokaci kol při brzdění
Aktuátor	Zařízení převádějící informaci reprezentovanou elektrickou veličinou na mechanickou veličinu
ASR	z angl. Anti Skid Regulation, popř. něm. AntriebsSchlupfRegelung, stabilizační systém vozidla zabraňující prokluzu hnáných kol při akceleraci
CAD	Computer-Aided Design. Použití počítačových technologií v návrhovém procesu.
DMP	z angl. Digital Motion Processor - Algoritmus přepočtu vstupních dat senzorů polohy na žádané veličiny
EDS	z něm. Elektronische Differential Sperre, stabilizační systém vozidla zlepšující trakci za ztížených jízdních podmínek
EMS	z něm. Elektronische Motorleistungs Steuerung, systém elektronického pedálu plynu, zajišťující možnost regulace výkonu motoru řídicí jednotkou
Enkodér	Elektronická součástka vyjadřující mechanickou polohu pomocí binárního kódu
ESP-IDF	z angl. Espressif IoT Development Framework - sada nástrojů pro knihoven pro programování mikrokontroléru ESP32
ESC	z angl. Electronic Speed Control, elektrický obvod ovlivňující rychlost a směr otáčení elektrického motoru
ESP	z angl. Electronic Stability Program, popř. něm. Elektronisches Stabilitäts Programm, stabilizační systém vozidla (popř.soubor systémů) napomáhající k jízdní stabilitě vozidla během průjezdu zatáčkou.
FSR	z angl. Force Sensitive Resistor - Rezistor citlivý na působící sílu
GPIO	General-Purpose Input/Output - Víceúčelový vstupně/výstupní vývod mikrokontroléru
I ² C	Inter-Integrated Circuit. Sériová komunikační sběrnice.
IoT	z angl. Internet of Things - Internet věcí
LSB	z angl. Least Significant Bit - Nejméně významný bit binárního zápisu ordinálního datového typu
MEMS	Micro-Electro-Mechanical-Systems. Technologie návrhu a výroby mikroskopických elektronických zařízení.

PCNT	Pulse Counter - Jednotka mikrokontroléru ESP32 čítající hrany vstupního signálu
PID regulátor	Proporcionálně integračně derivační regulátor
PWM	z angl. Pulse Width Modulation - Pulzně šířková modulace
SPI	Serial Peripheral Interface. Sériové periferní rozhraní.
TCS	z angl. Traction Control System. To stejné, co ASR.

SEZNAM PŘÍLOH

A Schéma zapojení

69

A SCHÉMA ZAPOJENÍ

Obr. A.1: Schéma zapojení řídicího mikrokontroléru ESP32 a ostatních funkčních komponent

